



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PENGARUH KAPASITANSI SISTEM (C_g DAN C_s)
TERHADAP TIMBULNYA FERORESONANSI PADA
SALURAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI**

Fuady Achmad Santoso
NRP 07111140000106

Dosen Pembimbing
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TE 141599

**STUDY OF THE EFFECT OF SYSTEM CAPACITANCE
PARAMETERS (C_g AND C_s) AGAINST RISE OF
FERORESONANCE IN HIGH VOLTAGE TRANSMISSION
LINES**

Fuady Achmad Santoso
NRP 07111140000106

Dosen Pembimbing
I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**Studi Pengaruh Kapasitansi Sistem (C_g dan C_s) Terhadap Timbulnya Feroresonansi pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 22 Januari 2019

Fuady Achmad Santoso
NRP. 07111140000106

**STUDI PENGARUH KAPASITANSI SISTEM (Cg
DAN Cs) TERHADAP TIMBULNYA
FERORESONANSI PADA SALURAN TRANSMISI
TEGANGAN TINGGI**


TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


IGN Satriyadi H., ST., MT.
NIP. 19730123 200212 1001


Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.
NIP. 19700712 199802 1001



STUDI PENGARUH KAPASITANSI SISTEM (C_g DAN C_s) TERHADAP TIMBULNYA FERORESONANSI PADA SALURAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI

Nama : Fuady Achmad Santoso
NRP : 07111140000106
Pembimbing I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Pembimbing II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,

ABSTRAK

Kapasitansi sistem (C_g dan C_s) merupakan sebuah variabel yang dapat mempengaruhi respon tegangan feroresonansi. Transformator merupakan sebuah peralatan yang dapat mengalami gangguan feroresonansi. Akibat yang ditimbulkan dari feroresonansi adalah terjadinya tegangan lebih dan arus lebih pada transformator. Tegangan lebih dapat merusak transformator. Tujuan dari tugas akhir ini yaitu untuk mengetahui pengaruh nilai kapasitansi sistem pada timbulnya gangguan feroresonansi. Untuk melakukan penelitian ini digunakan perangkat lunak ATPDraw. ATPDraw adalah sebuah perangkat lunak yang dapat melakukan simulasi fenomena transien. Feroresonansi merupakan fenomena gangguan transien pada sistem tenaga listrik. Variasi nilai kapasitansi sistem (C_g dan C_s) yang diberikan mulai dari 0,0005 μ F-20 μ F. Hasil respon tegangan pada ATPDraw dapat menunjukkan nilai maksimal dari tegangan lebih karena pengaruh feroresonansi. Dari variasi nilai kapasitansi C_g dan C_s yang diuji dapat diketahui nilai C_g dan C_s yang menyebabkan terjadinya feroresonansi paling besar.

Kata kunci: Kapasitansi sistem, transformator tiga fasa, feroresonansi, ATPDraw, respon tegangan, saluran transmisi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF THE EFFECT OF SYSTEM CAPACITANCE PARAMETERS (C_g AND C_s) AGAINST RISE OF FERORESONANCE IN HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

Name : Fuady Achmad Santoso
NRP : 07111140000106
Advisor I : IGN Satriyadi Hernanda, ST., MT.
Advisor II : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.

ABSTRACT

System capacitance (C_g and C_s) is a variable that can affect the ferroresonance voltage response. Ferroresonance is a disturbance phenomenon in the electric power system. Transformer is a device that can interfere with ferroresonance. The result of the ferroresonance is the occurrence of overvoltage and overcurrent on the transformer. Over voltage can damage the transformer. The purpose of this final project is to determine the system capacitance value of ferroresonance interference. To do this research ATPDraw software is used. ATPDraw is a software that can simulate transient phenomena. Variations in system capacitance values (C_g and C_s) are given starting from 0,0005μF-20 μF. The results of the voltage response on ATPDraw can show the maximum value of voltage because ferroresonance. From varying value of C_g and C_s can be known the value of C_g and C_s which causes the greatest ferroresonance.

Keywords: System capacitance, three phase transformer, ferroresonance, ATPDraw, voltage response, transmission lines

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Serta sholawat dan salam kami panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW, sahabat, ulama, dan seluruh umat islam yang ada di dunia.

Tujuan penyusunan tugas akhir ini yaitu untuk memenuhi persyaratan dalam pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya. Judul tugas akhir ini adalah:

STUDI PENGARUH KAPASITANSI SISTEM (Cg DAN Cs) TERHADAP TIMBULNYA FERORESONANSI PADA SALURAN TRANSMISI TEGANGAN TINGGI

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan motivasi yang diberikan kepada:

1. Allah SWT atas semua nikmat dan karunia-Nya
2. Ibu dr. Hj. Nurul Hidajati, Sp.Rad, Ayah Alm. Ir. H. Joko Santoso dan saudara-saudara atas bantuannya.
3. Istri tercinta Indah Rahmawati Rahman yang selalu mensupport dan memberi motivasi untuk terus berjuang meraih kesuksesan dunia dan akhirat.
4. Maryamah Kanya Fuady anugerah terindah Allah SWT.
5. Bapak I Gusti Ngurah Satriyadi Hernanda, ST., MT. dan Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu, membimbing dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
6. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan dalam membantu menyelesaikan studi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini. Besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik dari para pembaca. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca, khususnya bagi penulis sendiri.

Surabaya, 22 Januari 2019

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	I
ABSTRACT	III
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR GAMBAR	IX
DAFTAR TABEL	XIII
BAB I PENDAHULUAN	XII
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB II SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI, TRANSFORMATOR	4
2.1 STUDI PENELITIAN TERKAIT	5
2.2 SISTEM TENAGA LISTRIK	5
2.2.1 SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK	6
2.2.2 SALURAN TRANSMISI TENAGA LISTRIK	8
2.2 FERORESONANSI	9
2.2.1 PENGERTIAN RESONANSI	9
2.2.2 PENGERTIAN FERORESONANSI	10
2.2.3 KLASIFIKASI FERORESONANSI	11
2.3 TRANSFORMATOR	13
2.3.1 PRINSIP KERJA TRANSFORMATOR	13
2.3.2 RANGKAIAN EKIVALEN TRANSFORMATOR	15
2.3.3 KURVA MAGNETISASI INTI TRANSFORMATOR	17
BAB III PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN PENGOLAHAN DATA	19
3.1 PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI	19
3.2 PENENTUAN NILAI KAPASITANSI SISTEM CG DAN CS	20
3.3 PENGAMBILAN DATA DAN PENGOLAHAN DATA	21
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI DENGAN VARIASI NILAI KAPASITANSI SISTEM (CG DAN CS) ..	22
4.1 KONDISI NORMAL	23
4.2 FERORESONANSI KARENA <i>SWITCHING</i>	25

4.2.1	FERORESONANSI AKIBAT VARIASI <i>GRADING CAPACITANCE</i> (CG) DAN <i>SHUNT CAPACITANCE</i> (CS)...	25
4.2.1.1	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=20 MF$	26
4.2.1.2	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=10 MF$	33
4.2.1.3	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=5 MF$	40
4.2.1.4	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=0,5 MF$	47
4.2.1.5	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=0,001 MF$..	54
4.2.1.6	RESPON TEGANGAN FERORESONANSI DENGAN NILAI $CG_1=0,0005MF$ SAMPAI $CG_6=20MF$ DAN $CS=0,0005MF$	61
4.2.2.1	GRAFIK PERBANDINGAN RESPON TEGANGAN AKIBAT VARIASI CG DAN CS.....	68
4.2.2.2	GRAFIK 3 DIMENSI HASIL SIMULASI.....	72
BAB V	PENUTUP	75
5.1	KESIMPULAN	75
5.2	SARAN.....	75
	DAFTAR PUSTAKA	76
	LAMPIRAN	79
	RIWAYAT HIDUP	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Skema prinsip penyediaan enerfi listrik	6
Gambar 2. 2	Diagram garis sistem tenaga listrik	7
Gambar 2. 3	(a) Rangkaian Resonansi Seri (b) Rangkaian Resonansi Paralel.....	9
Gambar 2. 4	Rangkaian Dasar Feroresonansi	10
Gambar 2. 5	Karakteristik Mode Fundamental.....	11
Gambar 2. 6	Karakteristik Mode Subharmonik	11
Gambar 2. 7	Karakteristik Mode Quasi-periodik.....	12
Gambar 2. 8	Karakteristik Mode Chaotik	12
Gambar 2. 9	Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik	13
Gambar 2. 10	Transformator Sederhana [2]	14
Gambar 2. 11	Transformator Dengan Sumber Arus Bolak-Balik [15]	15
Gambar 2. 12	Rangkaian Ekvaleen Transformator [5].....	16
Gambar 2. 13	Kurva B-H.....	18
Gambar 3. 1	Diagram garis transformator	19
Gambar 3. 2	Rangkaian pemodelan feroresonansi ATPDraw	20
Gambar 3. 3	Flowchart pengambilan dan pengolahan data	22
Gambar 4. 1	Plot respon tegangan kondisi normal	24
Gambar 4. 2	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar 0,0005 μ F dan Cs=20 μ F	27
Gambar 4. 3	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar 0,001 μ F dan Cs=20 μ F	28
Gambar 4. 4	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar 0,5 μ F dan Cs=20 μ F.....	29
Gambar 4. 5	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar 5 μ F dan Cs=20 μ F	27
Gambar 4. 6	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar 10 μ F dan Cs=20 μ F	31
Gambar 4. 7	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar 20 μ F dan Cs=20 μ F	32
Gambar 4. 8	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar 0,0005 μ F dan Cs=10 μ F.....	34
Gambar 4. 9	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar 0,001 μ F dan Cs=10 μ F.....	35
Gambar 4. 10	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar 0,5 μ F dan Cs=10 μ F.....	36

Gambar 4. 11	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$	37
Gambar 4. 12	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$	38
Gambar 4. 13	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$	39
Gambar 4. 14	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	41
Gambar 4. 15	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	42
Gambar 4. 16	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	43
Gambar 4. 17	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	44
Gambar 4. 18	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	45
Gambar 4. 19	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$	46
Gambar 4. 20	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	48
Gambar 4. 21	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	49
Gambar 4. 22	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	50
Gambar 4. 23	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	51
Gambar 4. 24	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	52
Gambar 4. 25	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$	53
Gambar 4. 26	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$	55
Gambar 4. 27	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$	56
Gambar 4. 28	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$	57
Gambar 4. 29	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$	58

Gambar 4. 30	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar 10 μ F dan Cs=0,001 μ F	59
Gambar 4. 31	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar 20 μ F dan Cs=0,001 μ F	60
Gambar 4. 32	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg1 sebesar 0,0005 μ F dan Cs=0,0005 μ F	62
Gambar 4. 33	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg2 sebesar 0,001 μ F dan Cs=0,0005 μ F	63
Gambar 4. 34	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg3 sebesar 0,5 μ F dan Cs=0,0005 μ F	64
Gambar 4. 35	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg4 sebesar 5 μ F dan Cs=0,0005 μ F	65
Gambar 4. 36	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg5 sebesar 10 μ F dan Cs=0,0005 μ F	66
Gambar 4. 37	Respon tegangan feroresonansi dengan Cg6 sebesar 20 μ F dan Cs=0,0005 μ F	67

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Pemodelan Rangkaian Feroresonansi	19
---	----

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator adalah sebuah peralatan yang secara umum digunakan dalam transmisi tenaga listrik dan distribusi jaringan listrik. Untuk dapat mentransmisikan energi listrik dalam jumlah yang besar dengan losses yang kecil melalui sebuah konduktor maka diperlukan transmisi tegangan tinggi. Oleh karena itu, transformator digunakan pada saluran transmisi tegangan tinggi untuk meningkatkan level tegangan listrik.

Struktur utama dari transformator adalah rangkaian elektromagnetik. Trafo dioperasikan dalam daerah linier pada kurva karakteristik magnetisasinya [1]. Dalam beberapa kejadian terdapat suatu kondisi yang tidak normal pada pengoperasian trafo. Terdapat suatu fenomena yang mengakibatkan terjadinya tegangan lebih dan arus lebih pada transformator. Salah satu fenomena gangguan pada transformator yaitu dikenal dengan fenomena feroresonansi.

Feroresonansi adalah sebuah fenomena resonansi non linier yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Fenomena feroresonansi mengakibatkan tegangan lebih dan arus lebih, sehingga dapat membuat kerusakan yang sangat serius pada peralatan listrik. Fenomena ini dapat terjadi pada rangkaian listrik dalam sistem tenaga listrik yang memiliki kapasitansi, induktansi nonlinier, sumber tegangan AC dan diikuti oleh gangguan transient seperti pembukaan switch, adanya petir, dan hubung singkat.

Dalam studi [2], dilakukan sebuah penelitian pengaruh perbedaan karakteristik histerisis inti transformator terhadap gangguan feroresonansi dengan variasi grading capacitance dan shunt capacitance yang diikuti dengan switching tiga fasa secara serempak pada pemodelan rangkaian feroresonansi transformator tiga fasa. Namun dalam analisis tersebut belum diteliti mengenai pengaruhnya dalam saluran transmisi tegangan tinggi. Sehingga, diperlukan suatu studi untuk mengetahui pengaruh parameter grading capacitance dan shunt capacitance terhadap timbulnya feroresonansi pada saluran transmisi tegangan tinggi.

Dalam tugas akhir ini pengaruh parameter kapasitansi (C_g dan C_s) pada saluran transmisi tegangan tinggi akan disimulasikan dalam sebuah software ATPDraw, sehingga dapat diketahui pengaruhnya pada fenomena gangguan feroresonansi. Perhatian yang difokuskan pada studi ini yaitu pada pengaruh parameter kapasitansi C_g dan C_s dalam saluran transmisi tegangan tinggi terhadap timbulnya gangguan feroresonansi.

Studi ini difokuskan pada permasalahan pengaruh parameter kapasitansi sistem (C_g dan C_s) terhadap timbulnya gangguan feroresonansi pada saluran transmisi tegangan tinggi. Batasan-batasan masalah yang ada yaitu jenis transformator yang digunakan, trigger, variasi nilai parameter kapasitansi C_g dan C_s , nilai tegangan pada saluran transmisi tegangan tinggi serta analisis karakteristik feroresonansi yang timbul pada saluran transmisi tegangan tinggi yang disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw.

Sedangkan tujuan dan relevansi yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh timbulnya fenomena feroresonansi akibat pengaruh variasi nilai kapasitansi sistem (C_g dan C_s) pada saluran transmisi tegangan tinggi. Hasil simulasi dapat digunakan sebagai referensi baik dalam penelitian selanjutnya atau dalam melakukan klasifikasi dan menentukan karakteristik fenomena feroresonansi.

Dalam menyusun tugas akhir ini penulis melakukan metode penelitian dengan cara mengumpulkan referensi-referensi terkait fenomena feroresonansi, transformator, dan sistem transmisi tenaga listrik. Sedangkan untuk data transformator yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah menggunakan data dari penelitian tentang feroresonansi yang telah dilakukan pada tugas akhir sebelumnya. Setelah studi literatur dilakukan maka metode selanjutnya adalah melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi dan simulasi rangkaian tersebut pada software ATPDraw.

Untuk mendapatkan hasil simulasi sesuai tujuan yang diinginkan maka digunakan beberapa variasi nilai kapasitansi sistem (C_g dan C_s). Dari beberapa nilai kapasitansi sistem yang digunakan tersebut maka akan dapat diketahui pengaruhnya pada saluran transmisi tegangan tinggi. Setelah itu dilakukan analisis data dari simulasi yang telah dilakukan. Kesimpulan akhir dari hasil analisis data simulasi akan didapatkan untuk mengetahui timbulnya fenomena feroresonansi pada saluran transmisi tegangan tinggi akibat pengaruh kapasitansi sistem. Kesimpulan tersebut dapat digunakan sebagai referensi dalam melakukan klasifikasi dan menentukan karakteristik fenomena feroresonansi.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab 1 merupakan pendahuluan yang didalamnya mengandung latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, juga manfaat dan relevansi yang ingin didapatkan dari tugas akhir ini.

Bab 2 merupakan dasar teori yang mendukung antara lain dasar teori fenomena feroresonansi, transformator, sistem transmisi tenaga listrik, kapasitansi sistem.

Bab 3 merupakan pemodelan rangkaian feroresonansi dan metode yang akan digunakan dalam simulasi menggunakan ATPDraw dan pengambilan data hasil simulasi feroresonansi.

Bab 4 merupakan hasil yang didapatkan dari simulasi pemodelan rangkaian feroresonansi yang telah dilakukan dengan memberikan beberapa variasi nilai parameter kapasitansi sistem (C_g dan C_s). Analisis dari hasil simulasi juga dibahas dalam bab ini.

Bab 5 merupakan kesimpulan dari hasil analisis data dari simulasi yang telah dilakukan. Dalam bab ini juga terdapat saran untuk penelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II SISTEM TRANSMISI TENAGA LISTRIK, FERORESONANSI, TRANSFORMATOR

2.1 Studi Penelitian Terkait

Pada studi [2] dilakukan sebuah simulasi dengan melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi menggunakan 3 buah inti transformator tiga fasa yang berbeda. Kemudian terdapat beberapa batasan yang digunakan antara lain : trigger berupa switching tiga fasa secara serempak, variasi grading capacitance dan shunt capacitance, serta analisis karakteristik feroresonansi pada tegangan sisi primer dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw serta diagram bifurkasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Hasil studi tersebut menghasilkan beberapa kesimpulan yaitu: a) perbedaan inti transformator mempengaruhi respon gangguan feroresonansi, b) tipe inti M5 dengan core losses yang rendah dan minimum inductance yang kecil memiliki respon gangguan feroresonansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan inti tipe M0H dan ZDKH.

2.2 Sistem Tenaga Listrik

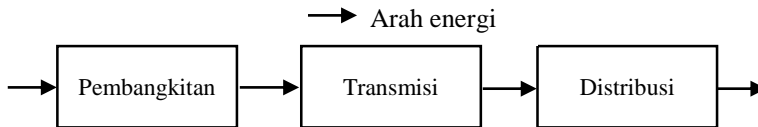
Energi listrik saat ini merupakan sebuah kebutuhan utama dalam kehidupan manusia. Untuk dapat melangsungkan kehidupannya energi listrik berperan penting dalam segala kegiatan yang dilakukan setiap hari. Maka dari itu, ketersediaan energi listrik harus diutamakan. Dalam proses penyediaan energi listrik terdapat tiga hal utama. Pembangkitan, transmisi, dan distribusi [3].

Pembangkitan adalah proses produksi energi listrik yang dilakukan pada pusat-pusat pembangkit dengan menggunakan generator sebagai alat untuk mengubah sumber energi tertentu menjadi energi listrik. Sumber energi dapat berasal dari batu bara, air, panas bumi, tenaga surya, bahan bakar minyak, angin, dll.

Transmisi adalah proses pemindahan atau pengiriman energi listrik dalam skala besar yang telah dibangkitkan dari pusat pembangkit menuju gardu induk. Gardu induk terletak berdekatan dengan daerah yang memiliki pemakaian energi listrik dalam jumlah besar. Seperti daerah perkotaan, pemukiman, dan industri.

Distribusi adalah proses penyaluran energi listrik kepada pengguna atau pelanggan energi listrik sesuai dengan kebutuhannya masing-masing. Karena setiap pelanggan energi listrik memiliki tingkat

kebutuhan energi listrik yang berbeda-beda. Proses distribusi dilakukan berawal dari gardu induk, gardu distribusi sampai ke pelanggan. Pada Gambar 2.1 dapat diketahui skema prinsip penyediaan tenaga listrik.



Gambar 2. 1 Skema prinsip penyediaan energi listrik

2.2.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

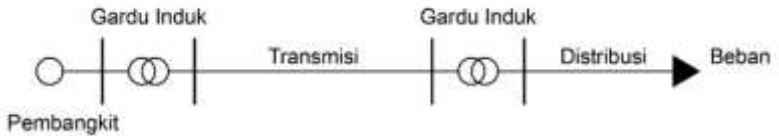
Suatu sistem tenaga listrik tersusun atas tiga sistem utama yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi. Energi listrik dibangkitkan pada pusat pembangkitan tenaga listrik yang umumnya letaknya jauh dari tempat dimana listrik itu digunakan atau pusat beban. Maka tegangan yang dibangkitkan dari generator harus dikirimkan atau disalurkan melalui kawat-kawat saluran transmisi [4].

Dari generator yang ada pada pusat pembangkit tegangan akan dinaikkan menggunakan transformator daya hingga mencapai 30kV sampai 500kV. Tingkat tegangan tersebut dinaikkan karena pada umumnya tingkat tegangan keluaran dari generator pada pusat pembangkit berkisar antara 6kV sampai 24kV.

Manfaat yang didapatkan dengan menaikkan tingkat tegangan dari pusat pembangkit yang akan disalurkan melalui saluran antara lain yaitu untuk memperkecil rugi-rugi daya, mengurangi tegangan jatuh, dan memperbesar daya hantar pada saluran transmisi.

Setelah ditransmisikan melalui saluran transmisi tegangan tinggi maka akan dilakukan proses penurunan tegangan yang dilakukan pada gardu induk. Dari tingkat tegangan tinggi pada saluran transmisi tegangan akan diturunkan ke tingkat tegangan yang lebih rendah. Contohnya, tegangan pada saluran transmisi tegangan 500kV diturunkan menjadi 150kV. Atau dari tingkat tegangan 150kV diturunkan tingkat tegangannya menjadi 70kV. Tingkat tegangan yang sudah diturunkan nantinya akan diturunkan lagi pada gardu distribusi. Misalnya dari 150kV tingkat tegangan diturunkan hingga mencapai 20kV, begitu pula dari 70kV akan diturunkan tingkat tegangannya menjadi 20kV. Untuk mempermudah lihat Gambar 2.2.

Pada Gambar 2.2 dapat kita ketahui jika sistem transmisi berperan menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit listrik ke sistem distribusi atau kepada konsumen. Sehingga dalam proses transmisi energi listrik dibutuhkan suatu saluran transmisi tenaga listrik.



Gambar 2. 2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan arus yang disalurkan terdapat dua jenis saluran transmisi. Saluran transmisi arus bolak-balik dan saluran transmisi arus searah. Terdapat keuntungan dan kerugian dari penggunaan kedua jenis saluran tersebut. Saluran transmisi bolak-balik merupakan jenis saluran transmisi yang umum digunakan saat ini. Kemudahan yang ada pada saluran transmisi arus bolak-balik yaitu dalam menaikkan dan menurunkan tegangan hanya diperlukan transformator saja. Berbeda dengan saluran transmisi arus searah yang memerlukan peralatan pengubah dari arus bolak-balik ke arus searah dan sebaliknya, sehingga diperlukan biaya peralatan yang lebih mahal.

Pada jenis saluran transmisi arus bolak-balik terbagi lagi menjadi dua jenis. Kedua jenis tersebut adalah sistem satu fasa dan sistem tiga fasa. Kelebihan dari sistem tiga fasa dibandingkan dengan sistem satu fasa adalah daya yang disalurkan lebih besar, nilai sesaatnya konstan, dan mempunyai medan magnet putar.

Ternyata dalam proses operasi transmisi energi listrik saluran transmisi akan mengalami rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya pada transmisi arus bolak-balik tiga fasa dapat dihitung dengan rumus :

$$\Delta P = 3 I^2 R \quad (2.1)$$

Dengan ΔP = rugi-rugi daya transmisi ac tiga fasa (watt)

I = arus pada kawat transmisi (A)

R = resistansi kawat transmisi masing-masing fasa (ohm)

Apabila arus kapasitif pada transmisi diabaikan, maka arus yang ada disepanjang saluran transmisi besarnya dapat dianggap sama. Kemudian besarnya arus disepanjang saluran transmisi tersebut sama dengan besarnya arus di ujung penerima transmisi. Sehingga arus pada kawat transmisi adalah :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos \varphi} \quad (2.2)$$

Dengan I = arus pada kawat transmisi (Ampere)

P = daya beban pada ujung penerima transmisi (Watt)

V = tegangan fasa-ke-fasa ujung penerima transmisi (Volt)

$\cos \varphi$ = faktor daya beban

Apabila rumus arus tersebut disubstitusikan pada persamaan sebelumnya didapatkan :

$$\Delta P = \frac{P^2 R}{\cos^2 \varphi V^2} \quad (2.3)$$

Dapat diketahui apabila besarnya rugi-rugi daya pada saluran transmisi berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi dan berbanding lurus dengan resistansi konduktor. Maka dari itu, untuk mengurangi rugi-rugi daya pada saluran transmisi yaitu dengan cara mempertinggi tegangan transmisi.

2.2.2 Saluran Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi adalah penghantar atau media yang digunakan untuk menghubungkan / menyalurkan energi listrik dari suatu sistem pembangkitan energi listrik menuju sistem distribusi yang pada akhirnya disalurkan kepada penerima / konsumen / beban. Berdasarkan konstruksi pemasangannya, saluran transmisi dibagi menjadi :

a. Saluran Udara (*Overhead Lines*)

Merupakan saluran transmisi yang menggunakan kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara transmisi. Saluran udara memiliki keuntungan yaitu lebih murah dan perawatan yang lebih mudah. Kekurangan yang dimilikinya yaitu karena berada di ruang terbuka, sering mengalami gangguan. Seperti terkena ranting pohon yang mengakibatkan terjadinya hubung singkat, tersambar petir, terkena paparan cuaca panas, debu, dan hujan. Selain itu, karena menggunakan kawat-kawat penghantar dan juga menara transmisi maka secara keindahan saluran ini tidak cocok digunakan ditengah kota yang padat.

b. Saluran Kabel Tanah (*Underground Lines*)

Saluran kabel tanah merupakan saluran transmisi yang letak atau posisi salurannya berada didalam tanah, dipendam didalam tanah, didalam sebuah ruang di dalam tanah. Keuntungan dari saluran ini yaitu lebih aman dari gangguan, dan cuaca, secara keindahan juga baik karena tidak mengganggu pemandangan kota. Namun biaya instalasi

dan investasi yang mahal dan sulitnya ketika mencari titik gangguan karena terpendam didalam tanah.

c. Saluran Kabel Laut (*Submarine Lines*)

Saluran kabel laut merupakan saluran transmisi yang menggunakan kabel laut (submarine cable) dan letak salurannya berada didalam laut. Biasanya saluran transmisi ini digunakan untuk menghubungkan snstr pulsu

Berdasarkan tegangan yang di transmisikan, saluran transmisi dibagi menjadi :

a. Tegangan Ekstra Tinggi

Tegangan nominal yang ditransmisikan sebesar 500kV

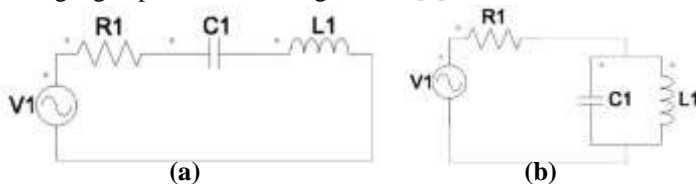
b. Tegangan Tinggi

Tegangan nominal yang ditransmisikan sebesar 150kV dan 70kV

2.2 Feroresonansi

2.2.1 Pengertian Resonansi

Resonansi adalah sebuah fenomena gangguan yang terjadi pada suatu rangkaian listrik bolak-balik. Resonansi dapat terjadi karena adanya elemen kapasitor dan induktor. Gangguan ini dapat ditemui pada semua level tegangan pada sistem tenaga listrik [3]



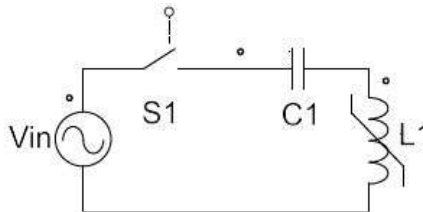
Gambar 2. 3 (a) Rangkaian Resonansi Seri (b) Rangkaian Resonansi Paralel

Resonansi terbagi menjadi dua tipe, yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri adalah resonansi yang terjadi pada rangkaian seri. Sedangkan resonansi paralel adalah resonansi yang terjadi pada rangkaian paralel. Resonansi seri akan mengakibatkan nilai arus dalam rangkaian menjadi maksimum. Penyebabnya adalah nilai impedansi yang bernilai minimum atau mendekati nol karena kompensasi antara induktor dan kapasitor ($X_L = X_C$). Sehingga $jX = 0$ dan membuat $Z = R$. Sedangkan resonansi paralel akan mengakibatkan nilai tegangan menjadi maksimum. Sebagai contoh fenomena resonansi dapat diketahui pada sistem pentanahan Petersen Coil yang digunakan untuk mengurangi arus gangguan satu fasa ke tanah pada jaringan tegangan menengah.

Pengaruh resonansi yang ditimbulkan adalah terjadinya tegangan lebih atau arus lebih.

2.2.2 Pengertian Feroresonansi

Feroresonansi atau memiliki nama lain resonansi non-linier atau *ferromagnetic resonance* secara literatur pertama kali muncul pada tahun 1920. Fenomena ini dapat didefinisikan sebagai sebuah fenomena gangguan resonansi non-linier yang dapat mengganggu jaringan listrik, merusak peralatan listrik, menyebabkan kegagalan sistem proteksi, bahkan menyebabkan terjadinya *blackout* (pemadaman). Beberapa gangguan yang tidak normal pada sistem tenaga listrik dapat dianggap berasal dari fenomena resonansi nonlinier. Dalam [3] dijelaskan bahwa semua fenomena osilasi yang terjadi pada rangkaian listrik setidaknya mengandung induktansi non-linier, kapasitansi, sumber tegangan sinusoidal, *losses* yang rendah.



Gambar 2. 4 Rangkaian Dasar Feroresonansi

Feroresonansi terjadi karena adanya interaksi antara kapasitansi dalam suatu rangkaian listrik dengan induktansi non-linier pada inti besi transformator. Pada saat yang sama terjadi suatu gangguan transien atau pemicu transien seperti petir, *switching* pemutus daya, *motor starting*, *short-circuit*.

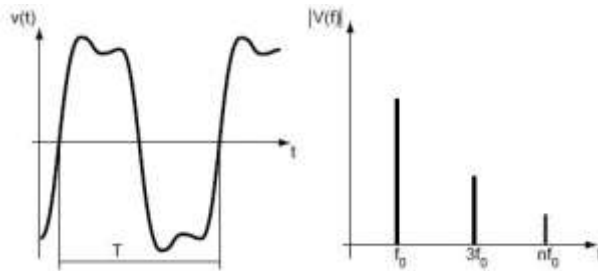
Adanya *trigger* transien tersebut dapat memicu transformator bekerja hingga nilai induktansinya menjadi tidak linear lagi atau nilai induktansi mencapai ujung kurva magnetisasi transformator. Jika nilai induktansi transformator mencapai nilai yang sama dengan nilai kapasitansi sistem maka akan mengakibatkan adanya perubahan pada gelombang tegangan transformator.

Perubahan gelombang tegangan yang terjadi pada suatu frekuensi dan dalam waktu yang lama akan mengakibatkan terjadinya *overvoltage*. Jika *overvoltage* ini terus terjadi transformator akan mengalami kerusakan bahkan bisa sampai terbakar.

2.2.3 Klasifikasi Ferroresonansi

Terdapat empat mode dalam klasifikasi ferroresonansi. Karena pada kondisi transien tidak mudah dalam membedakan antara sinyal ferroresonansi dengan sinyal lain, maka dalam melakukan klasifikasi mode ferroresonansi kondisi yang digunakan yaitu kondisi *steady state* atau kondisi tunak. Berikut keempat mode ferroresonansi :

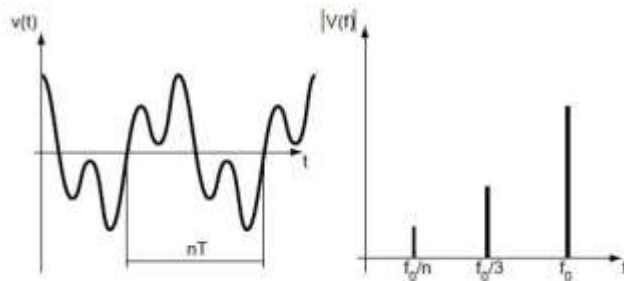
a. Mode Fundamental



Gambar 2. 5 Karakteristik Mode Fundamental

Karakteristik lihat pada **Gambar 2.4** pada mode ini sinyal tegangan dan arus memiliki nilai periode yang sama dengan periode sistem dan dapat memiliki tingkat harmonisa yang bervariasi. Spektrum diskontinu mode ini terdiri atas frekuensi fundamental sistem (f_0) dan harmonisanya ($3f_0, \dots, nf_0$).

b. Mode Subharmonik

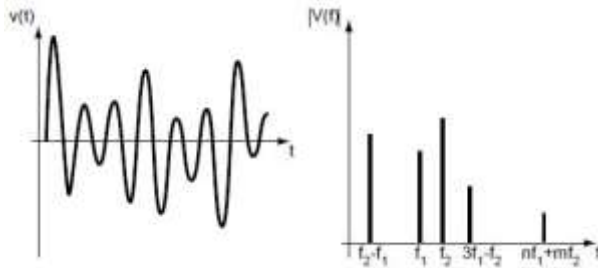


Gambar 2. 6 Karakteristik Mode Subharmonik

Karakteristik lihat pada Gambar 2.5 pada mode ini sinyal tegangan dan arus memiliki nilai periode kelipatan periode sistem (nT). Nama lain dari mode ini adalah subharmonik n atau harmonik $1/n$. Spektrum

dasar pada mode ini besarnya adalah frekuensi sumber (f_0) dibagi dengan suatu bilangan integer (n). Selain itu juga terdapat harmonik dengan nilai tertentu.

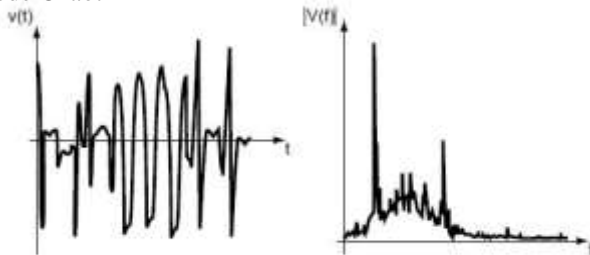
c. Mode Quasi-periodik



Gambar 2. 7 Karakteristik Mode Quasi-periodik

Karakteristik lihat pada Gambar 2.6 pada mode ini sinyal tegangan dan arus memiliki nilai yang tidak periodik. Nama lain dari mode ini adalah pseudo-periodik. Spektrumnya pun juga diskontinu, frekuensi dari spektrum dirumuskan sebagai nf_1+mf_2 (n dan m adalah bilangan integer dan f_1/f_2 adalah bilangan real irrasional).

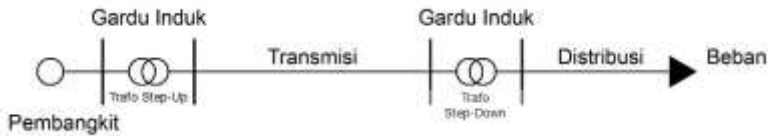
d. Mode Chaotik



Gambar 2. 8 Gambar Karakteristik Mode Chaotik

Karakteristik lihat pada Gambar 2.7 pada mode ini sinyal tegangan dan arus memiliki nilai yang diskontinu dan tidak periodik. Selain itu bentuk respon sinyalnya tidak beraturan, dan frekuensi harmonik yang kompleks.

2.3 Transformator



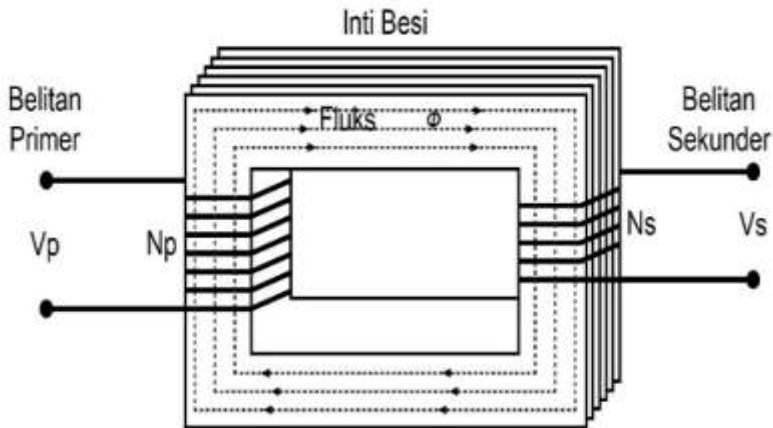
Gambar 2. 9 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik dapat diketahui bahwa transformator merupakan peralatan yang penting dan utama. Untuk melakukan proses transmisi energi listrik dari pembangkit hingga mencapai beban paling ujung diperlukan sebuah teknik dan peralatan yang dapat membuat energi listrik bisa tersalurkan dengan baik untuk dimanfaatkan oleh penggunaanya.

Pada Gambar 2.8 dapat kita ketahui untuk melakukan transmisi energi listrik diperlukan transformator daya *step-up* yang berguna untuk menaikkan tegangan yang dibangkitkan generator. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator besarnya terbatas dalam kilovolt, sedangkan pada sistem transmisi dibutuhkan tegangan dengan level tegangan puluhan sampai ratusan kilovolt. Sehingga di dibutuhkan peralatan transformator daya *step-up* [4]. Sebaliknya tegangan yang dibuthkan oleh pelanggan besarnya hanya berkisar antara ratusan volt sampai puluhan kilovolt. Maka dibutuhkan transformator daya *step-down* untuk mengubah level tegangan dari sistem transmisi menuju sistem distribusi. Sehingga secara umum, transformator digunakan atau berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan level tegangan pada sistem tenaga listrik.

2.3.1 Prinsip Kerja Transformator

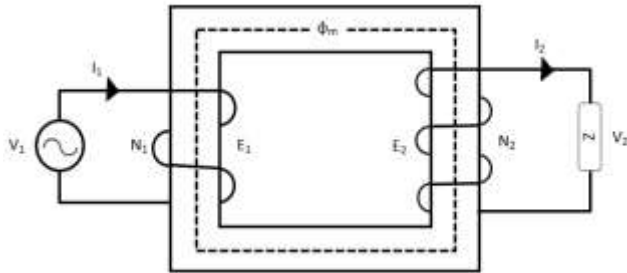
Transformator memiliki prinsip kerja yang berdasarkan induksi-elektromagnet, yaitu menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi dimana inti besi itu adalah tempat terjadinya fluks magnet [5].



Gambar 2. 10 Transformator Sederhana [2]

Perhatikan Gambar 2.10 yang merupakan model transformator sederhana. Trafo terdiri dari dua gulungan kawat yang terpisah satu sama lain, namun dibelitkan pada inti besi yang sama [6]. Fluks magnet dibangkitkan oleh aliran listrik yang melalui belitan primer. Agar arus listrik dapat dibangkitkan pada belitan sekunder maka arus listrik yang dialirkan pada sisi belitan primer harus menggunakan arus bolak-balik. Ilustrasi seperti pada Gambar 2.10. Dengan adanya sumber arus bolak-balik fluks magnet yang dibangkitkan menjadi berubah-ubah sehingga pada belitan sekunder tegangan dapat dibangkitkan.

Ketika belitan primer terhubung dengan sumber arus bolak-balik maka pada belitan primer akan timbul gaya gerak magnet bolak-balik juga. Pada saat yang sama di sekitar belitan primer juga akan terjadi fluks magnet. Akibat adanya fluks magnet ini pada belitan sekunder juga akan timbul gaya gerak listrik induksi yang besarnya sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik pada belitan primer. Besarnya gaya gerak listrik yang timbul tergantung pada perbandingan belitan primer dan belitan sekunder. Ketika belitan sekunder dihubungkan dengan beban maka akan timbul tegangan sekunder.



Gambar 2. 11 Transformator Dengan Sumber Arus Bolak-Balik [15]

Besarnya gaya gerak listrik yang dibangkitkan dapat dihitung dengan [6] :

$$E_1 = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

dimana : E_1 = gaya gerak listrik primer (volt)

N_1 = jumlah belitan primer

$d\phi$ = perubahan garis gaya magnet (webber)

dt = perubahan waktu (detik)

Berdasarkan konstruksi transformator pada Gambar x.y dapat dijelaskan hubungan tegangan, arus, jumlah belitan antara sisi primer dengan sisi sekunder tranformator yaitu :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.5)$$

Selain itu hubungan dengan arus :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{a} \quad (2.6)$$

Keterangan :

V_1 = Tegangan primer

V_2 = Tegangan sekunder

N_1 = Jumlah belitan primer

N_2 = Jumlah belitan sekunder

I_1 = Arus primer

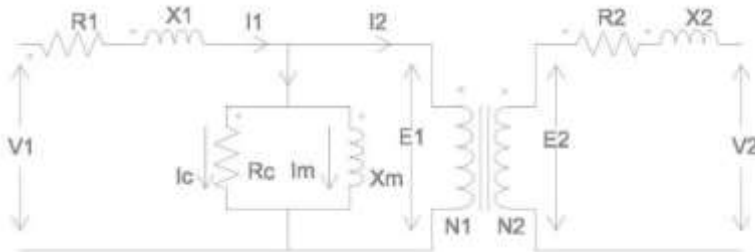
I_2 = Arus sekunder

a = Rasio transformasi

2.3.2 Rangkaian Ekivalen Transformator

Dalam perhitungan untuk mengetahui kerja transformator pada keadaan nyata dapat dilakukan sebuah pemodelan rangkaian (rangkaiian ekivalen) yang memperhitungkan fluks bocor ϕ_1 dan ϕ_2 ditunjukkan

dengan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 , rugi-rugi tahanan ditunjukkan dengan R_1 dan R_2 [5]. Juga terdapat model rangkaian ekivalen dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 12 Rangkaian Ekivalen Transformator

Keterangan :

- V_1 = Tegangan primer
- V_2 = Tegangan sekunder
- N_1 = Jumlah belitan primer
- N_2 = Jumlah belitan sekunder
- R_1 = Hambatan primer
- R_2 = Hambatan sekunder
- X_1 = Reaktansi primer
- X_2 = Reaktansi sekunder
- X_m = Reaktansi magnet
- R_c = Hambatan inti

Pada kenyataannya terdapat beberapa rugi-rugi pada transformator yang dapat mempengaruhi perhitungan transformator [7]. Rugi-rugi tersebut antara lain:

1. Rugi-rugi tembaga

Merupakan rugi-rugi pada belitan transformator yang berasal dari bahan tembaga, yaitu ditunjukkan dengan timbulnya panas pada belitan transformator. Besar kecilnya rugi-rugi tembaga dipengaruhi oleh jumlah belitan karena berkaitan dengan luas permukaan belitan. Semakin banyak belitan maka akan semakin luas pula permukaannya.

2. Rugi-rugi arus eddy

Rugi-rugi arus eddy terletak pada inti transformator, berkaitan dengan panas yang dihasilkan dari induksi bahan konduktor dari inti transformator dengan aliran arus yang melewati inti tersebut. Untuk memperkecil rugi-rugi arus eddy maka inti transformator dibentuk dengan menggunakan inti besi berlapis.

3. Rugi-rugi histeris

Rugi-rugi ini berkaitan dengan penyusunan kembali medan magnet pada inti transformator pada setiap setengah siklus. Akibatnya timbul fluks bolak-balik pada inti besi transformator. Besarnya rugi-rugi ini tidak linear dan kompleks.

4. Fluks bocor

Fluks bocor ini adalah rugi-rugi dimana fluks magnet yang dibangkitkan tidak dapat menembus inti transformator, sehingga fluks hanya melewati satu belitan saja. Akibatnya akan timbul *leakage inductance* yang berpengaruh terhadap nilai daya yang dari sisi primer ke sisi sekunder transformator.

Besarnya rugi-rugi pada inti transformator dapat dirumuskan [6]:

$$P_c = P_h + P_e$$

Dimana, P_c = rugi-rugi inti transformator

P_h = rugi-rugi histerisis

P_e = rugi-rugi arus eddy

Rugi-rugi inti transformator dapat dihitung dengan menggunakan hasil pengujian dengan rangkaian terbuka pada transformator.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_M^{1.6}$$

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_M^2$$

Dimana, K_h = konstanta histerisis, tergantung pada bahan inti

K_e = konstanta arus eddy, tergantung pada volume inti

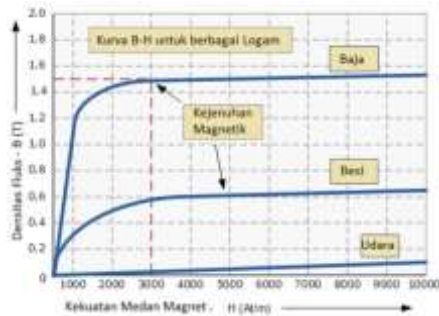
f = frekuensi jala-jala

B_M = kerapatan fluks maksimal ($\phi/A = \text{maxwell/meter}^2$)

2.3.3 Kurva Magnetisasi Transformator

Karakteristik pada inti besi transformator dapat diketahui melalui kurva B-H atau kurva magnetisasi. Kurva B-H merupakan kurva yang terbentuk dari pemetaan nilai *magnetic flux density* atau kerapatan fluks magnet (B) sebagai sumbu vertikal dan pemetaan *magnetic field strength* atau kuat medan magnet (H) sebagai sumbu horizontal [ElmoABB].

Kurva magnetisasi merupakan representasi dari inti yang ada pada sebuah transformator. Pada Gambar 2.13 dapat diketahui apabila perbedaan jenis inti transformator akan menghasilkan kurva magnetisasi yang berbeda. Artinya kurva B-H akan memiliki nilai kemiringan dan titik



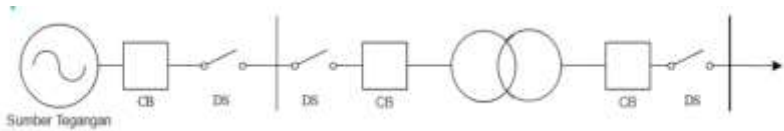
Gambar 2. 13 Kurva B-H

jenuh karena pengaruh jenis bahan inti transformator. Kemiringan B terhadap H pada Gambar 2.13 menunjukkan harga permeabilitas inti transformator. Dari kurva B-H dapat diketahui jika harga permeabilitas akan meningkat dan kemudian akan berangsu-angsur menurun pada keadaan inti transformator yang jenuh. Dari kurva B-H tersebut dapat diketahui jika pada inti transformator memiliki karakteristik yang tidak linear.

BAB III PEMODELAN RANGKAIAN FERORESONANSI DAN PENGOLAHAN DATA

3.1 Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

Sebelum melakukan pemodelan rangkaian feroresonansi maka diperlukan diagram garis dari suatu rangkaian terlebih dahulu. Pada Gambar 3.1 terdapat beberapa peralatan, diantaranya sumber tegangan bolak-balik, pemutus daya, dan transformator.



Gambar 3. 1 Diagram garis transformator

Dari single line diagram tersebut nantinya akan dibuat suatu pemodelan pada perangkat lunak ATPDraw. Pemodelan rangkaian feroresonansi dilakukan untuk mengetahui respon dari adanya *trigger* transien yaitu berupa *switching* yang terjadi pada pemutus daya. Fenomena feroresonansi ini terjadi pada saluran transmisi tegangan tinggi dimana terdapat beberapa elemen yaitu sumber tegangan arus bolak-balik 70kV , parameter kapasitansi (C_g dan C_s), switch sebagai *trigger* transien, transformator daya, beban berupa resistor.

Tabel 3. 1 Parameter Pemodelan Rangkaian Feroresonansi

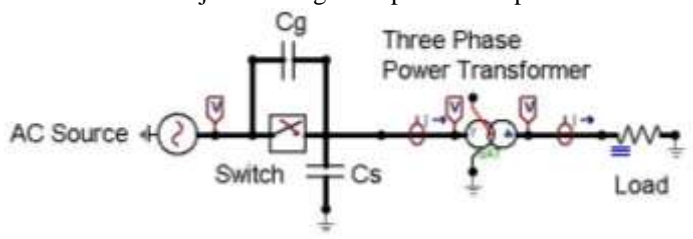
Parameter	Nilai	Satuan
Sumber Tegangan	70	kV
Frekuensi	50	Hz
Grading Capacitance (C_{g1} - C_{g6})	0,0005-20	μF
Shunt Capacitance (C_{s1} - C_{s6})	0,0005-20	μF
Swithing (Switch)	0,05	S
Resistansi Magnetisasi Inti M5	621.567,2206	Ω
Resistansi Primer	1,275396152	Ω
Resistansi Sekunder	0,029027625	Ω
Induktansi Primer	0,000485622	mH
Induktansi Sekunder	0,066098551	mH

Terdapat dua kondisi dalam pemodelan rangkaian feroresonansi, yaitu pada kondisi normal dan pada kondisi dimana terdapat *trigger* berupa *switching*. Terdapat dua kondisi tujuannya sebagai pembangking antara kondisi normal dengan kondisi ketika terjadi feroresonansi. Fokus

utama penelitian ini adalah ingin mengetahui pengaruh kapasitansi sistem (C_g dan C_s) terhadap timbulnya feroresonansi pada saluran transmisi tegangan tinggi. Parameter tersebut akan divariasikan dalam proses simulasi. Parameter pada rangkaian dapat dilihat pada Tabel 3.1. Pada rangkaian pemodelan ATPDraw terdapat sumber tegangan bolak-balik dengan nilai tegangan sebesar 70kV, 50Hz. Kemudian terdapat *switch* yang merepresentasikan pemutus daya pada sistem tenaga listrik. Kemudian terdapat dua buah kapasitansi, yang pertama adalah kapasitansi C_g atau *grading capacitance* yang dihubungkan paralel dengan switch. Kedua, terdapat *shunt capacitance* (C_s) yang juga terhubung paralel dengan rangkaian dan diketanahkan. Setelah *switch* terdapat transformator *step down* yang mengubah tegangan dari 70kV menjadi 6kV dengan daya sebesar 6 MVA. Keluaran dari transformator akan terhubung langsung dengan beban.

Dasar pemilihan nilai parameter C_g dan C_s dalam tugas akhir ini yaitu berdasarkan studi literatur [swee peng ang] dalam penelitian tersebut untuk mendapatkan respon feroresonansi dari variasi nilai C_g dan C_s digunakan nilai dengan range yang berkisar antara $0,001\mu\text{F}$ - $0,01045\mu\text{F}$. Dalam penelitian [swee pwng ang] tersebut dihasilkan beberapa akibat variasi nilai parameter C_g dan C_s yang dapat diklasifikasikan mode feroresonansinya. Maka dalam penelitian ini digunakan batas variasi nilai C_g dan C_s yang sedikit lebih lebar yaitu antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ untuk mengetahui pengaruh variasi parameter kapasitansi tersebut pada timbulnya feroresonansi.

Tipe inti transformator yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu tipe M5 yang terbukti pada penelitian [2] memiliki respon feroresonansi yang lebih baik dari pada tipe inti lainnya. Data yang diperoleh pada penelitian sebelumnya digunakan untuk melakukan simulasi dengan menambahkan perubahan pada rentang variasi nilai kapasitansi C_g dan C_s . Gambar 3.2 menunjukkan rangkaian pemodelan pada ATPDraw.



Gambar 3. 2 Rangkaian pemodelan feroresonansi ATPDraw

3.2 Penentuan Nilai Kapasitansi Sistem Cg dan Cs

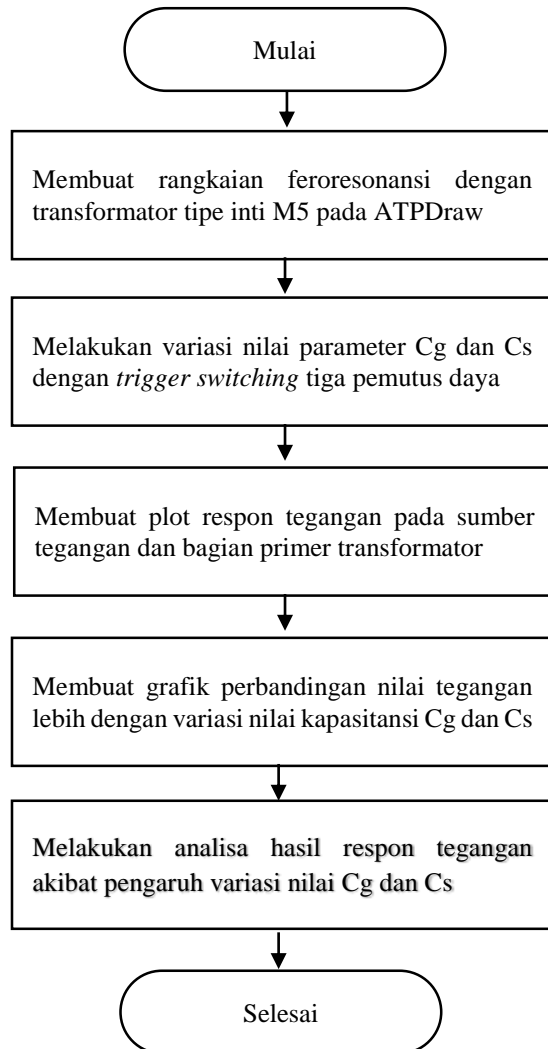
Penentuan nilai kapasitansi sistem Cg dan Cs berdasarkan penelitian sebelumnya [2] , akan tetapi pada studi nilai parameter kapasitansi Cg dan Cs yang ada lebih banyak atau memiliki rentang nilai kapasitansi yang lebih besar yaitu antara 0,0005-20 μ F.

Cg merupakan nilai kapasitansi *grading* atau *grading capacitance* yang ada pada saat terjadinya *switching* pemutus daya. Sedangkan Cs ada nilai kapasitansi *shunt* atau *shunt capacitance* yang muncul antara konduktor transmisi dengan *ground*. Dengan adanya rentang variasi nilai Cg dan Cs yang lebih besar diharapkan dapat diketahui berapa nilai kapasitansi sistem Cg dan Cs yang paling berpengaruh terhadap timbulnya feroresonansi.

3.3 Pengambilan Data dan Pengolahan Data

Data pada tugas akhir ini didapatkan dengan menggunakan perangkat lunak ATP Draw. Perangkat lunak ATP Draw dapat melakukan simulasi fenomena transien dari sebuah rangkaian listrik. Pada proses pengambilan data yang dilakukan terdapat dua kondisi berbeda. Kondisi pertama adalah saat dimana belum terjadi *trigger switching* atau kondisi normal. Kedua yaitu kondisi yang terjadi setelah adanya *trigger switching*. Respon tegangan yang didapatkan akan menghasilkan keadaan akibat variasi nilai kapasitansi sistem. Data yang diambil merupakan hasil dari variasi dari kapasitansi Cg antara 0,0005-20 μ F begitu juga dengan nilai kapasitansi Cs antara 0,0005-20 μ F.

Sedangkan untuk pengolahan data yaitu dari respon tegangan yang bersumber dari plot ATPDraw maka akan didapatkan nilai tegangan puncak dari masing-masing fasa dari sumber tegangan, sisi primer trafo, dan sisi sekunder trafo. Karena variasi nilai kapasitansi Cg dan Cs yang banyak maka didapatkan respon tegangan yang bermacam-macam dan respon tegangan tersebut akan menunjukkan mode dari feroresonansi yang timbul karena *trigger switching* pada pemutus daya.



Gambar 3. 3 Flowchart pengambilan dan pengolahan data

BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI DENGAN VARIASI NILAI KAPASITANSI SISTEM (Cg DAN Cs)

4.1 Kondisi Normal

Pada kondisi normal, yaitu kondisi dimana belum terjadi *switching* yang menjadi *trigger* transien, respon tegangan yang dihasilkan belum menunjukkan adanya gangguan akibat feroresonansi. Pada semua rentang variasi nilai Cg maupun Cs selama belum terjadi *switching* respon tegangan masih normal.

Respon tegangan menunjukkan nilai sebesar 57,15 kV untuk setiap fasa R-S-T. Nilai tersebut merupakan nilai tegangan puncak dari respon tegangan tiap fasa sebelum adanya *switching*. Nilai tersebut berasal dari :

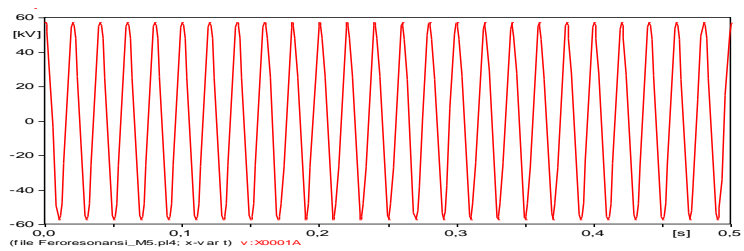
$$\begin{aligned} V_{L-Lrms} &= 70\text{kV} \\ V_{L-Nrms} &= \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} V_{L-Nrms} &= \frac{70\text{kV}}{\sqrt{3}} = 40414,518\text{V} = 40,41\text{kV} \\ V_{\text{peak}L-N} &= \sqrt{2} V_{L-Nrms} \end{aligned} \quad (4.2)$$

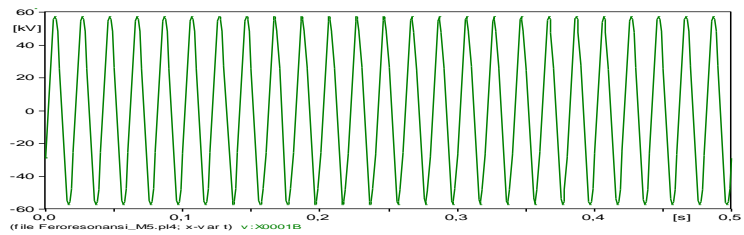
$$V_{\text{peak}L-N} = \sqrt{2}(40,41\text{kV}) = 57154,76\text{V} = 57,15\text{kV}$$

Sumber tegangan AC 70kV dengan frekuensi 50Hz merupakan tegangan line-to-line rms (V_{L-Lrms}). Dari tegangan sumber tersebut dapat diketahui tegangan line-to-netral rms (V_{L-Nrms}) yaitu sesuai persamaan 4.1, maka didapat nilai V_{L-Nrms} sebesar 40,41kV. Selanjutnya berdasarkan persamaan 4.2 nilai tegangan puncak line-to-netral dapat dihitung sebesar 57,15kV.

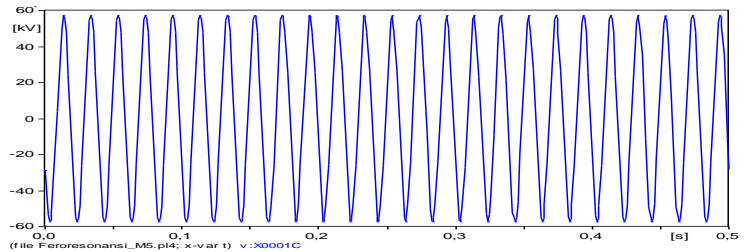
Pada Gambar 4.1 diperlihatkan bahwa respon tegangan pada tiap fasa tidak mengalami perubahan akibat gangguan feroresonansi, karena *switching* yang merupakan *trigger* terjadinya feroresonansi belum terjadi. Besarnya tegangan puncak dari fasa A, fasa B, fasa C besarnya sama yaitu 57,15 kV. Dari respon tegangan tersebut terlihat jelas belum adanya gangguan feroresonansi. Penyebabnya karena belum terjadi *switching* sebagai *trigger* feroresonansi. Terlihat bahwa respon tegangannya masih normal sinusoidal tidak terdapat kecacatan pada gelombang respon tegangan. Respon tegangan ini didapatkan dari sisi sumber tegangan sebelum pemutus daya. Respon tegangan ini berguna sebagai pembanding dengan respon tegangan saat terjadi feroresonansi.



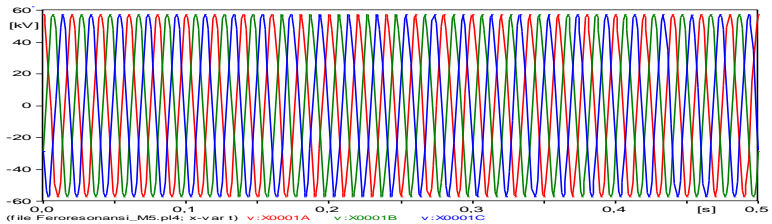
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 1 Plot respon tegangan kondisi normal :
 (a) fasa A (b) fasa B (c) Fasa C (d) Fasa A-B-C

4.2 Feroresonansi Karena *Switching*

Pada rangkaian pemodelan terdapat *switch* yang berfungsi sebagai *trigger* feroresonansi. Pada simulasi ditentukan waktu dimana terjadi *switching* yaitu pada $t=0,05s$ dengan waktu simulasi total $t=0,5s$. Ketika terjadi *switching* pada $t=0,05s$ maka respon gelombang tegangan akan mengalami perubahan karena terjadi feroresonansi. Pada penelitian ini dilakukan variasi nilai kapasitansi C_g dengan rentang antara $0,0005\mu F$ sampai dengan $20\mu F$. Begitu pula dengan nilai kapasitansi C_s memiliki rentang antara $0,0005\mu F$ sampai $20\mu F$. Diharapkan dengan memberikan rentang nilai kapasitansi yang lebih besar dari penelitian sebelumnya [2] maka nilai kapasitansi sistem (C_g dan C_s) yang paling berpengaruh pada timbulnya feroresonansi dapat diketahui.

4.2.1 Feroresonansi Akibat Variasi *Grading Capacitance* (C_g) dan *Shunt Capacitance* (C_s)

Dalam simulasi yang dilakukan pada rentang nilai variasi kapasitansi C_g antara $0,0005\mu F$ - $20\mu F$ digunakan enam buah nilai untuk mengetahui respon tegangan feroresonansi. Nilai C_g yang digunakan yaitu $C_{g1}=0,0005\mu F$, $C_{g2}=0,001\mu F$, $C_{g3}=0,5\mu F$, $C_{g4}=5\mu F$, $C_{g5}=10\mu F$, dan $C_{g6}=20\mu F$. C_g atau *grading capacitance* merupakan nilai kapasitansi yang berasal dari pemutus daya dan nilainya dapat bervariasi [8].

Kemudian simulasi yang dilakukan pada rentang nilai variasi kapasitansi C_s antara $0,0005\mu F$ - $20\mu F$ digunakan enam buah nilai untuk mengetahui respon tegangan feroresonansi. Nilai C_s yang digunakan yaitu $C_{s1}=0,0005\mu F$, $C_{s2}=0,001\mu F$, $C_{s3}=0,5\mu F$, $C_{s4}=5\mu F$, $C_{s5}=10\mu F$, dan $C_{s6}=20\mu F$. C_s atau *shunt capacitance* merupakan nilai kapasitansi yang berasal dari konduktor transmisi dan nilainya ground [2].

4.2.1.1 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai Variasai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$

Gambar 4.2 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $77,35\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $84,5\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $36,86\text{kV}$. Dapat diketahui dengan variasi nilai C_g yang lebih kecil dari C_s menghasilkan respon tegangan yang nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.

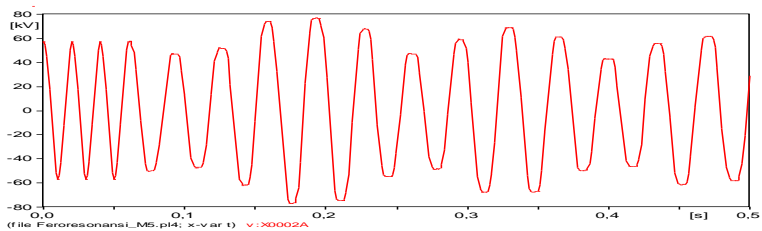
Gambar 4.3 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $77,34\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $84,5\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $36,86\text{kV}$. Dapat diketahui dengan variasi nilai C_g yang lebih kecil dari C_s menghasilkan respon tegangan yang nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.

Gambar 4.4 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $77,7\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $83,14\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $35,01\text{kV}$. Dapat diketahui dengan variasi nilai C_g yang lebih kecil dari C_s menghasilkan respon tegangan yang nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.

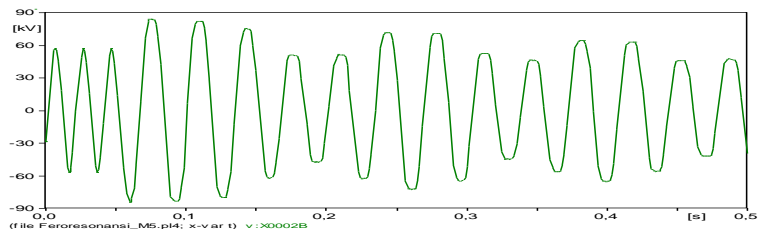
Gambar 4.5 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $75,18\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $77,63\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $34,44\text{kV}$. Respon tegangan nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.

Gambar 4.6 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $74,75\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $70,18\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $71,35\text{kV}$. Respon tegangan yang nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.

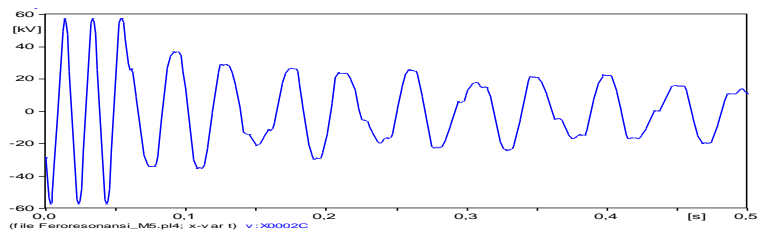
Gambar 4.7 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar $79,07\text{kV}$, pada fasa-B sebesar $81,5\text{kV}$, pada fasa-C sebesar $64,58\text{kV}$. Dapat diketahui dengan variasi nilai C_g sama dengan C_s menghasilkan respon tegangan yang nilainya tidak jauh berbeda dari kondisi normal.



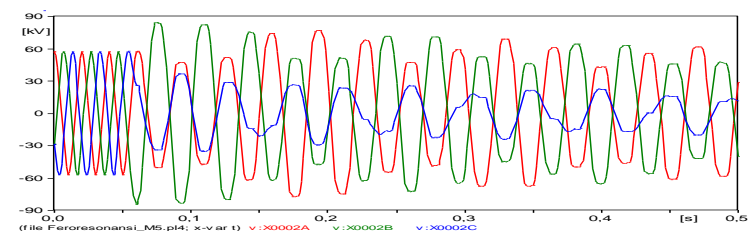
(a)



(b)

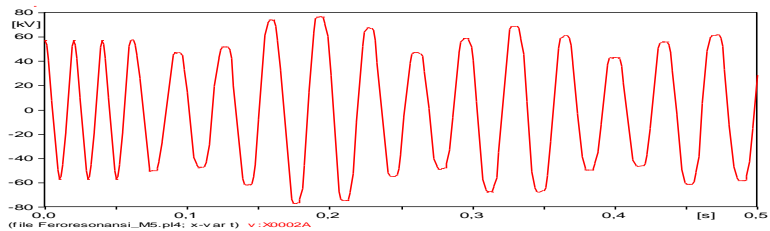


(c)

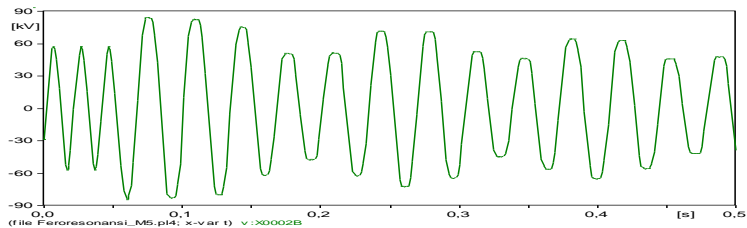


(d)

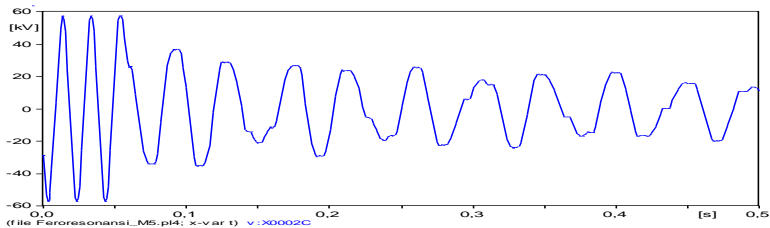
Gambar 4. 2 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



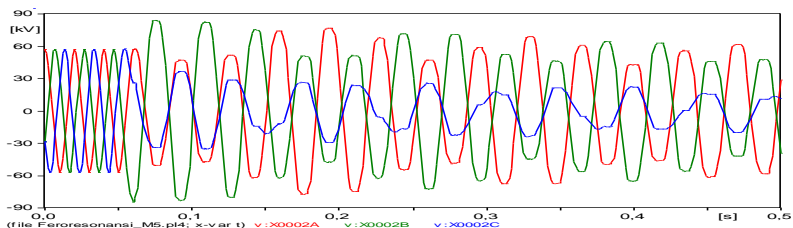
(a)



(b)

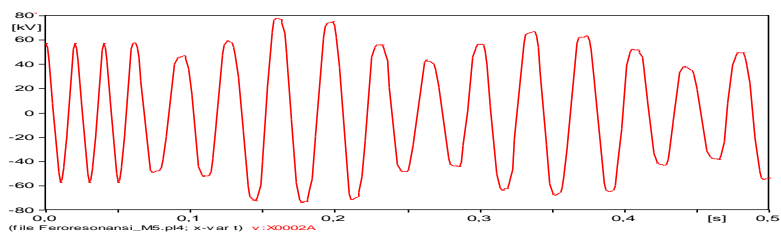


(c)

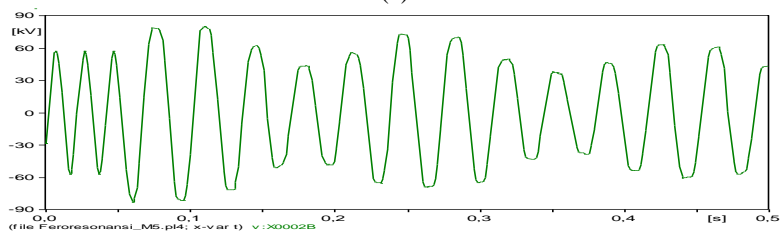


(d)

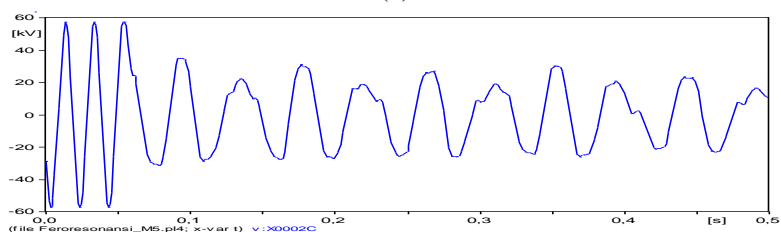
Gambar 4. 3 Respon tegangan feresonansi dengan C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



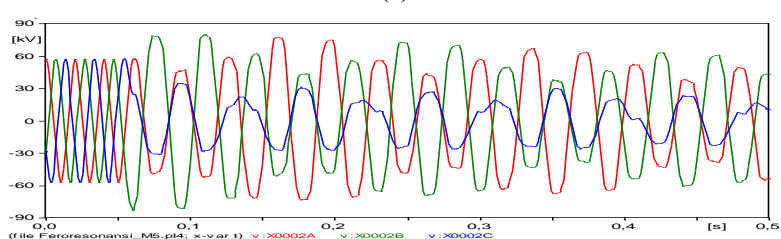
(a)



(b)

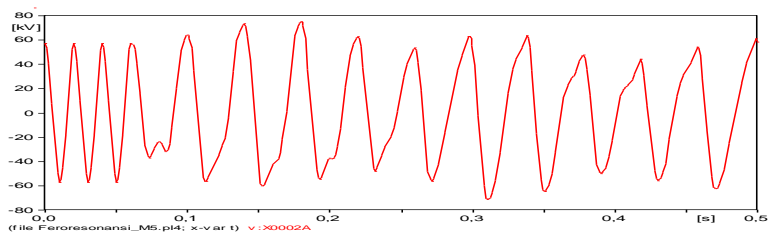


(c)

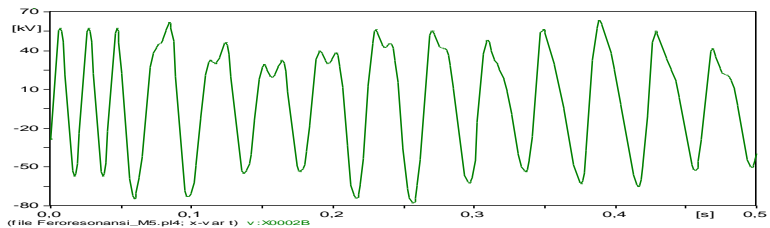


(d)

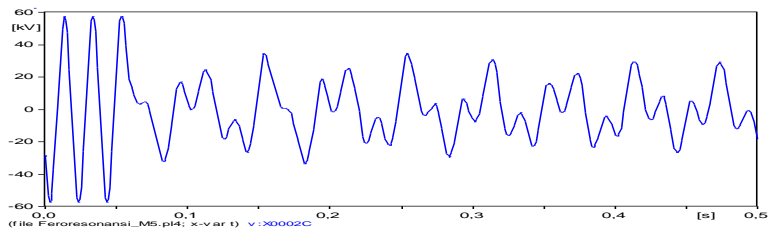
Gambar 4. 4 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



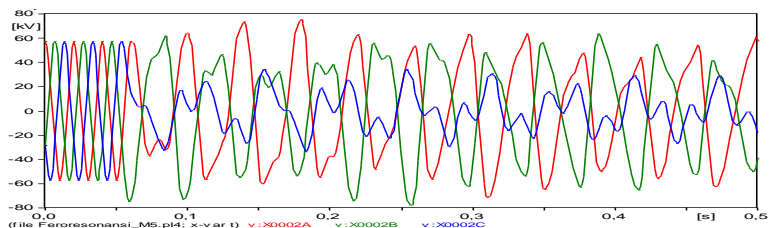
(a)



(b)

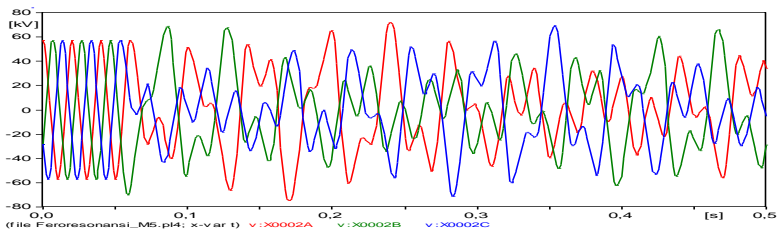
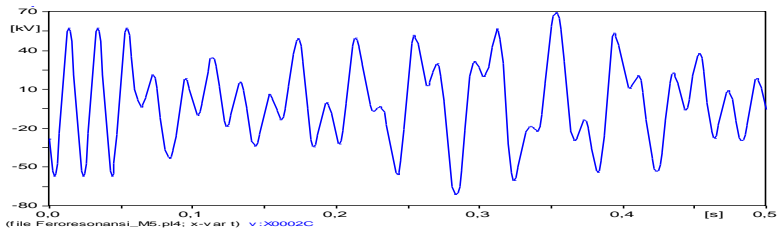
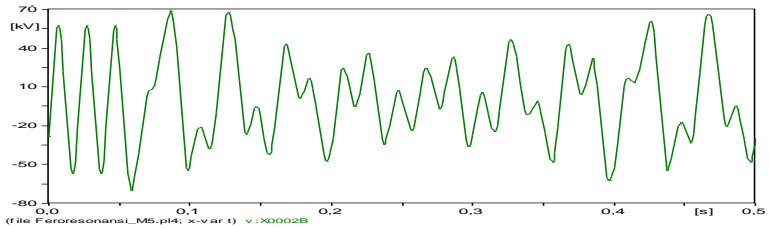
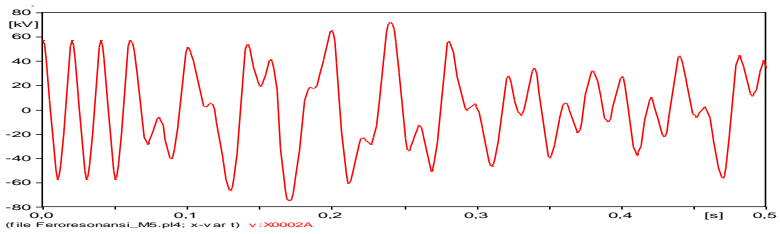


(c)

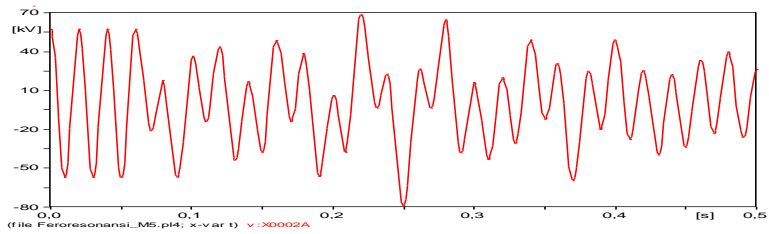


(d)

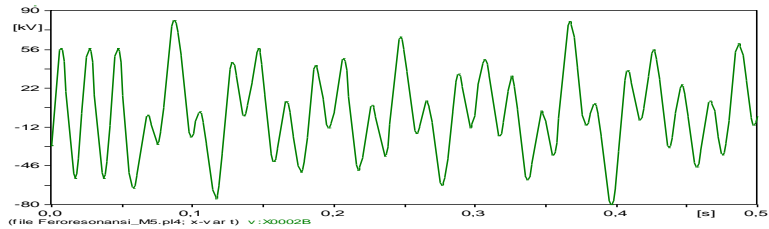
Gambar 4. 5 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



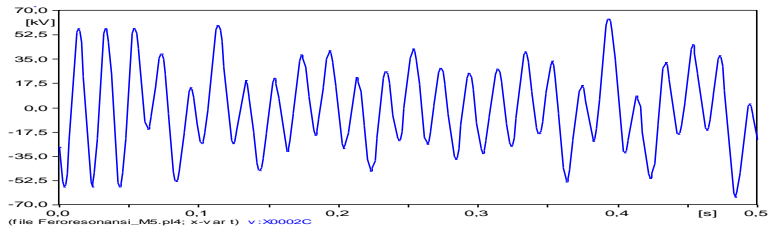
Gambar 4. 6 Respon tegangan ferroresonansi dengan C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



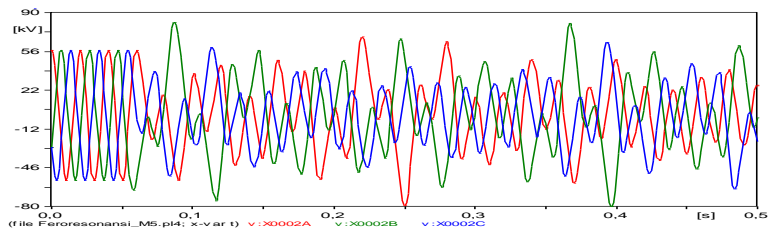
(a)



(b)



(c)



Gambar 4. 7 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=20\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

(d)

4.2.1.2 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai Variasai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$

Gambar 4.8 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 93,79kV, pada fasa-B sebesar 91,52kV, pada fasa-C sebesar 95,89kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,60-1,67 dari kondisi normal.

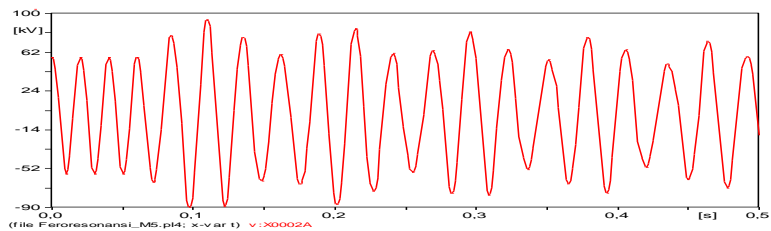
Gambar 4.9 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 93,77kV, pada fasa-B sebesar 91,52kV, pada fasa-C sebesar 95,89kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,60-1,67 dari kondisi normal.

Gambar 4.10 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 85,69kV, pada fasa-B sebesar 89,38kV, pada fasa-C sebesar 93,79kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,49-1,64 dari kondisi normal.

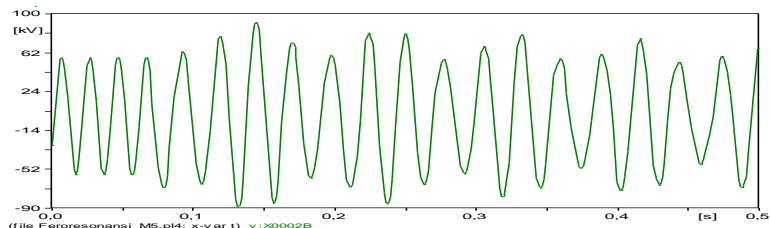
Gambar 4.11 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 103,11kV, pada fasa-B sebesar 86,25kV, pada fasa-C sebesar 97,33kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,5-1,8 dari kondisi normal.

Gambar 4.12 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 103,15kV, pada fasa-B sebesar 96,19kV, pada fasa-C sebesar 92,41kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,61-1,8 dari kondisi normal.

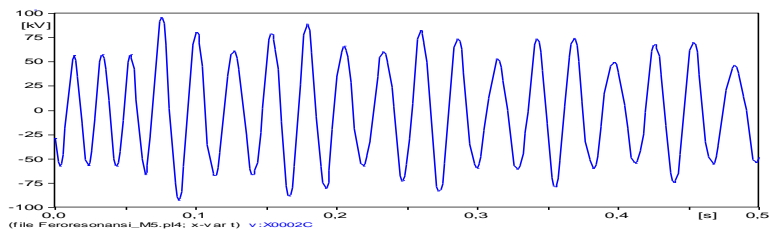
Gambar 4.13 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 78,81kV, pada fasa-B sebesar 83,17kV, pada fasa-C sebesar 98,55kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,37-1,72 dari kondisi normal.



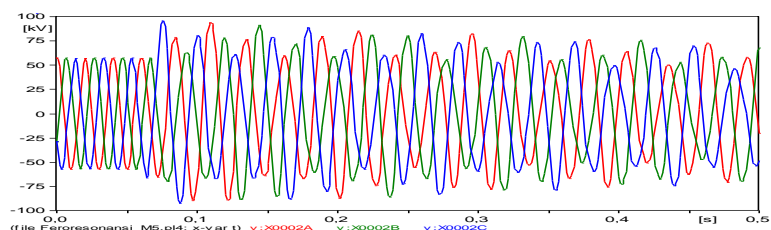
(a)



(b)

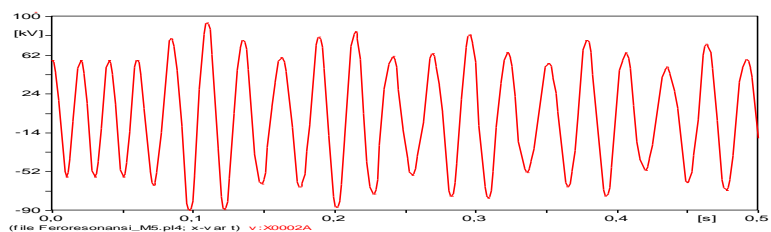


(c)

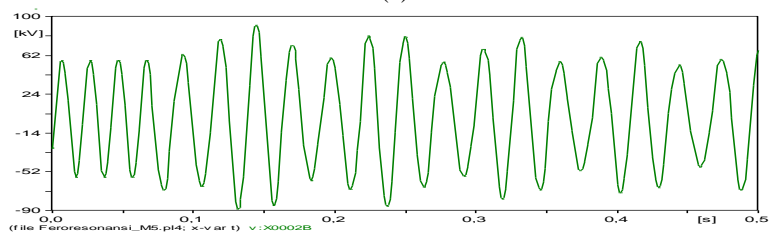


(d)

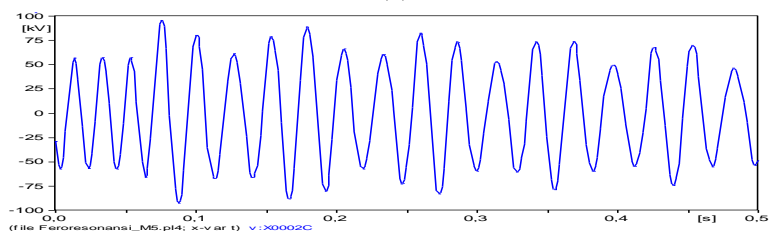
Gambar 4. 8 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



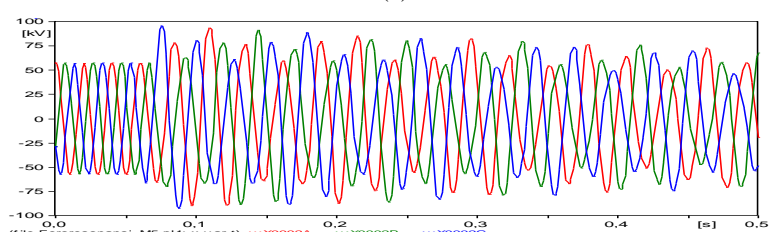
(a)



(b)

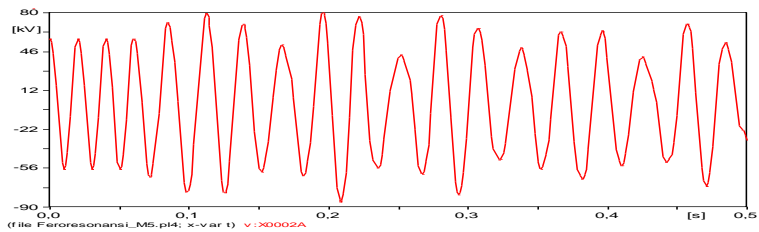


(c)

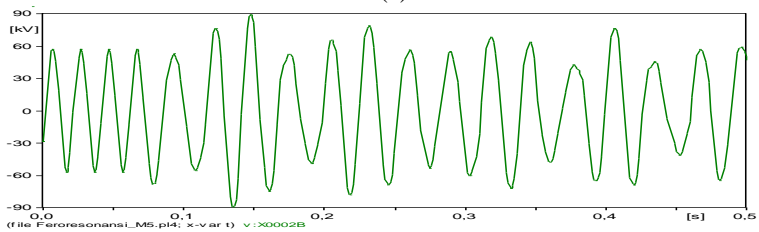


(d)

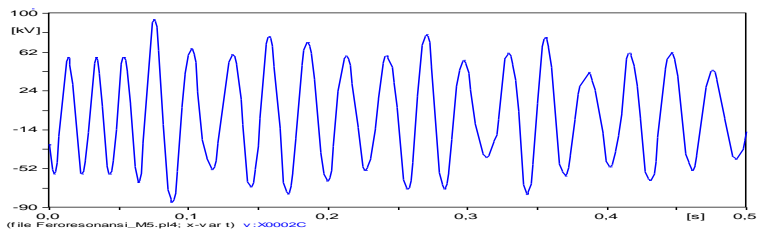
Gambar 4.9 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



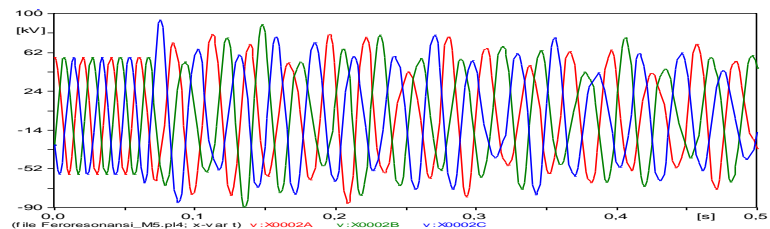
(a)



(b)

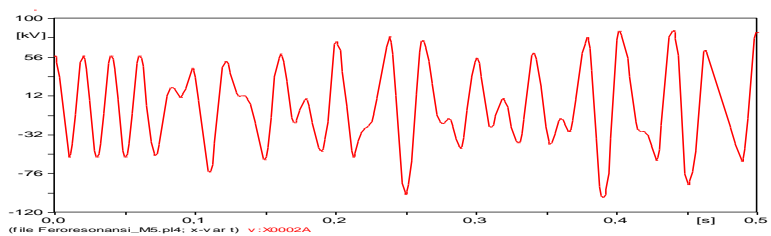


(c)

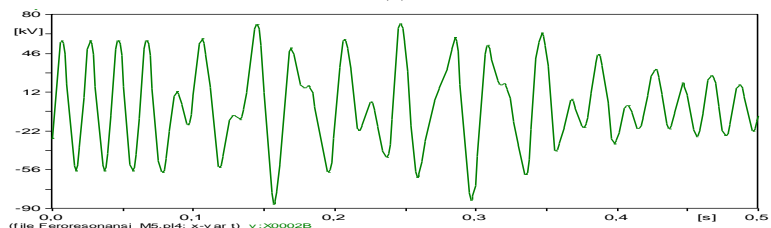


(d)

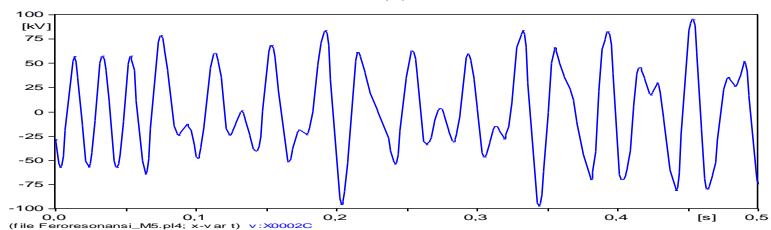
Gambar 4. 10 Respon tegangan ferroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



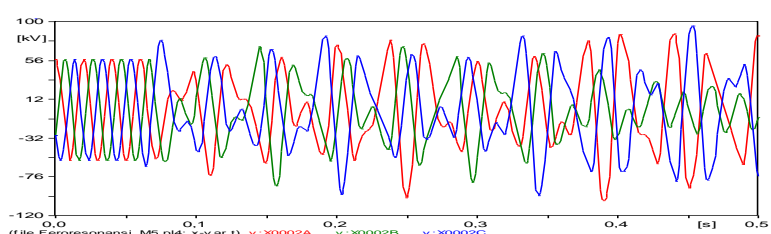
(a)



(b)

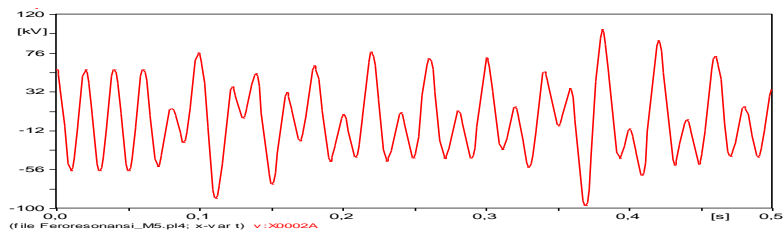


(c)

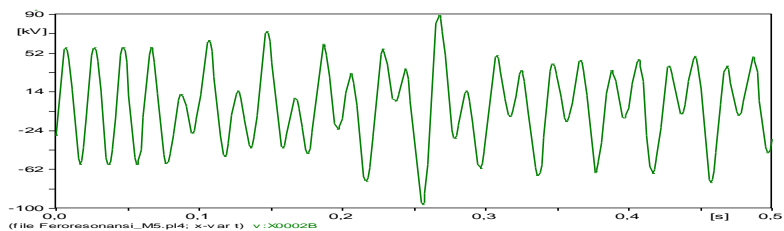


(d)

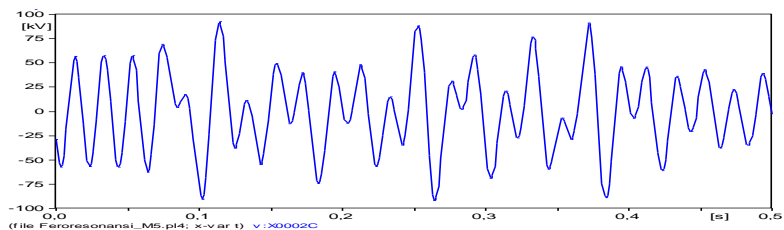
Gambar 4. 11 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



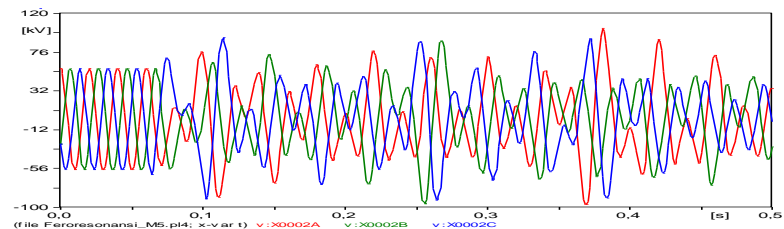
(a)



(b)

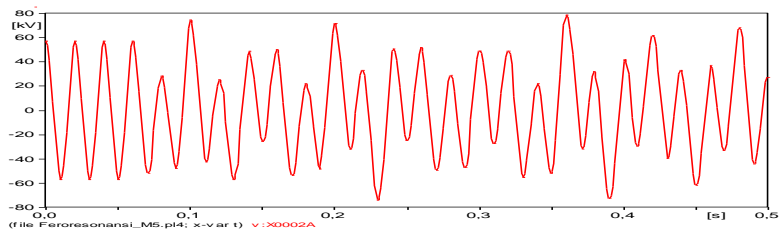


(c)

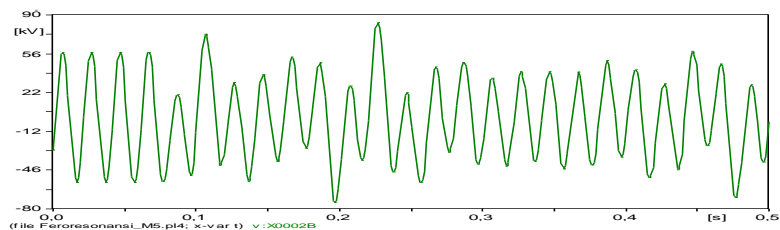


(d)

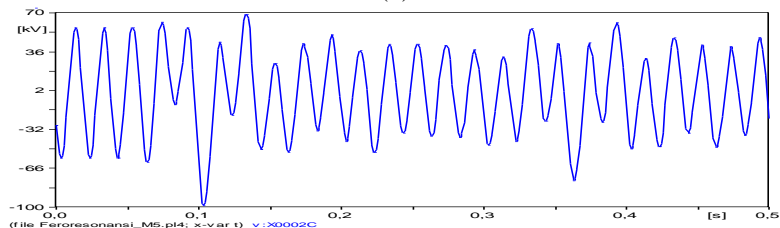
Gambar 4. 12 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



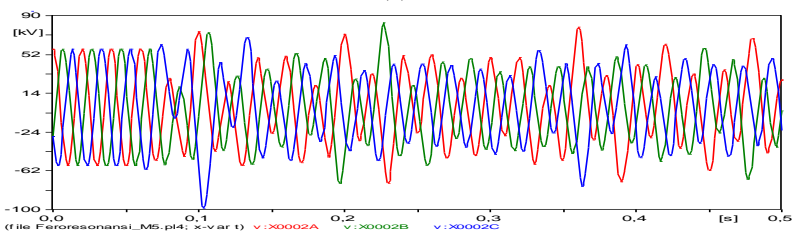
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 13 Respon tegangan feroresonansi dengan C_g s sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=10\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa- B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

4.2.1.3 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$

Gambar 4.14 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 115,29kV, pada fasa-B sebesar 111,49kV, pada fasa-C sebesar 97,6kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,70-2,01 dari kondisi normal.

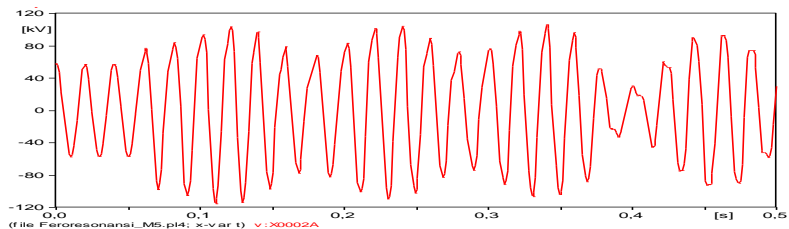
Gambar 4.15 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 115,28kV, pada fasa-B sebesar 111,51kV, pada fasa-C sebesar 97,74kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,71-2,01 dari kondisi normal.

Gambar 4.16 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 92,2kV, pada fasa-B sebesar 66,15kV, pada fasa-C sebesar 74,29kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,29-1,61 dari kondisi normal.

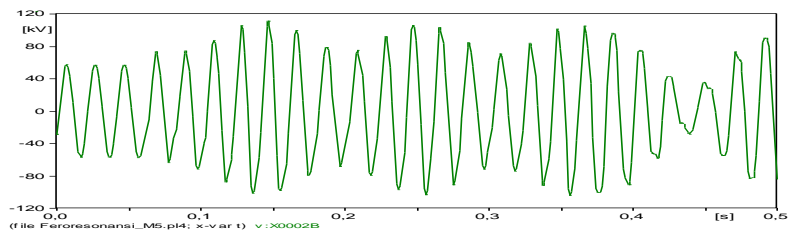
Gambar 4.17 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 469,5kV, pada fasa-B sebesar 665,78kV, pada fasa-C sebesar 667,03kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 8,21-11,67 dari kondisi normal.

Gambar 4.18 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 82,07kV, pada fasa-B sebesar 84,43kV, pada fasa-C sebesar 81,29kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,42-1,47 dari kondisi normal.

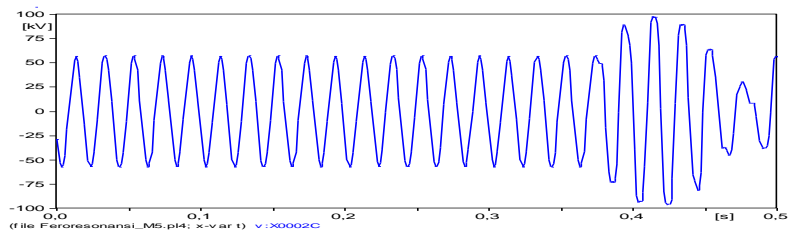
Gambar 4.19 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 133,93kV, pada fasa-B sebesar 144,75kV, pada fasa-C sebesar 118,93kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 2,08-2,53 dari kondisi normal.



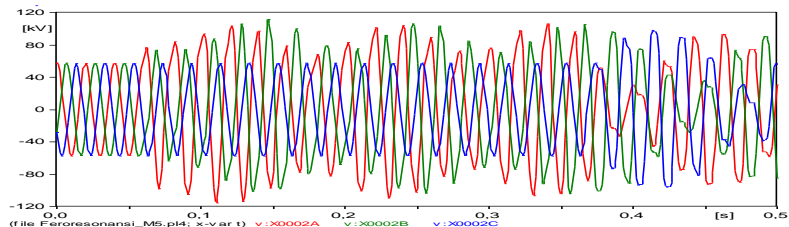
(a)



(b)

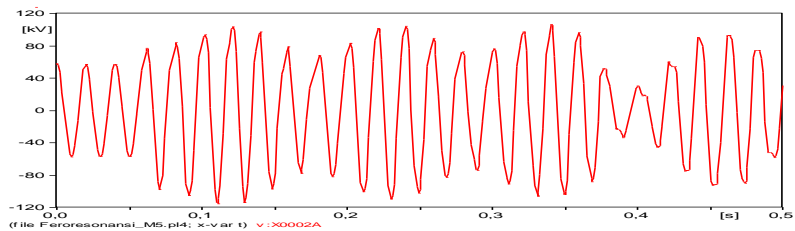


(c)

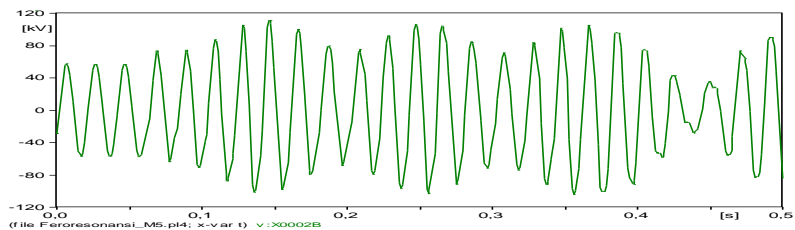


(d)

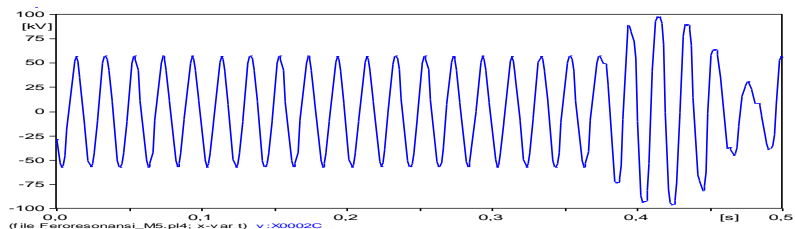
Gambar 4.14 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



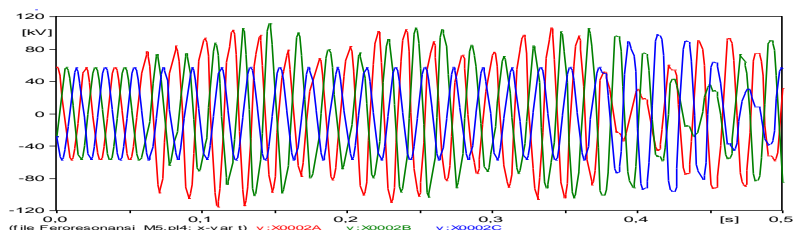
(a)



(b)

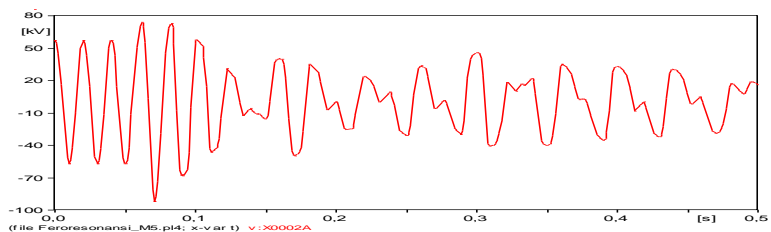


(c)

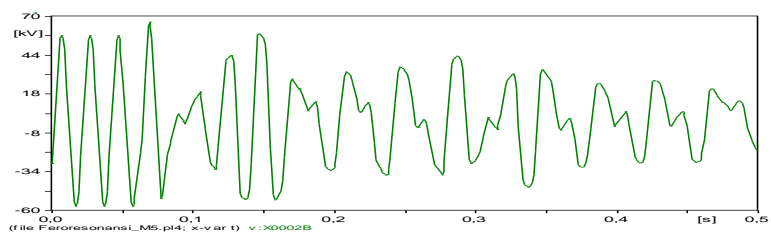


(d)

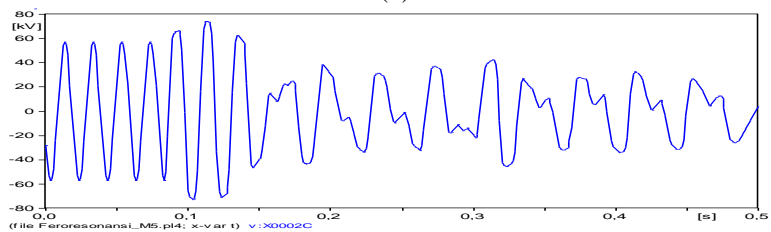
Gambar 4. 15 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



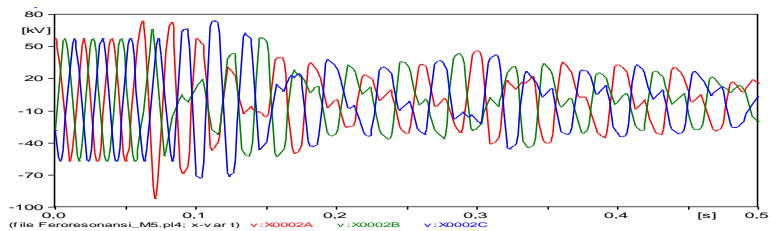
(a)



(b)

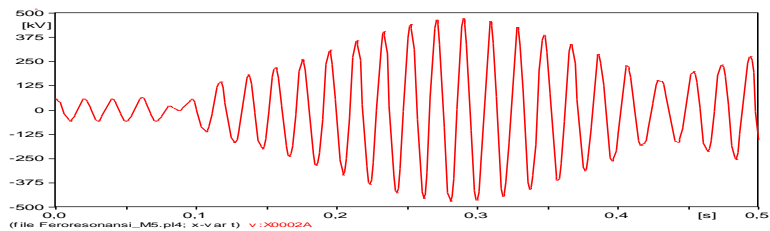


(c)

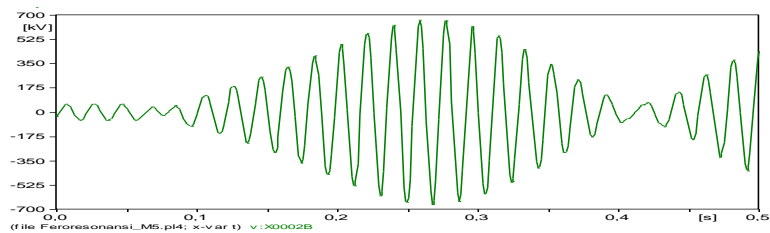


(d)

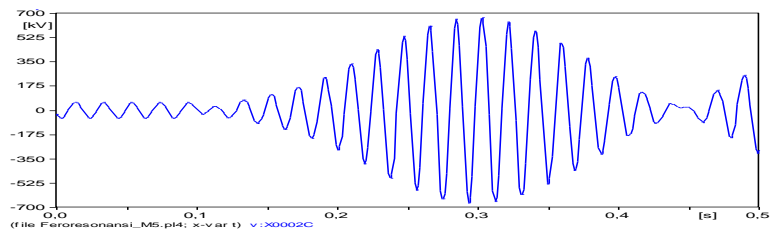
Gambar 4. 16 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



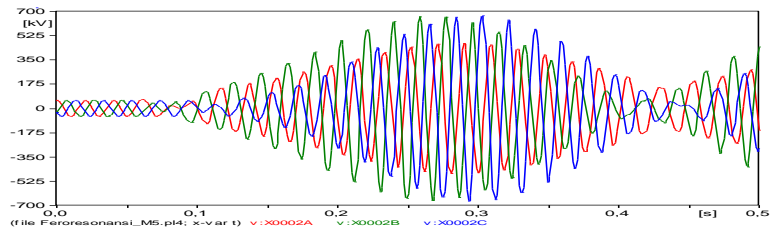
(a)



(b)

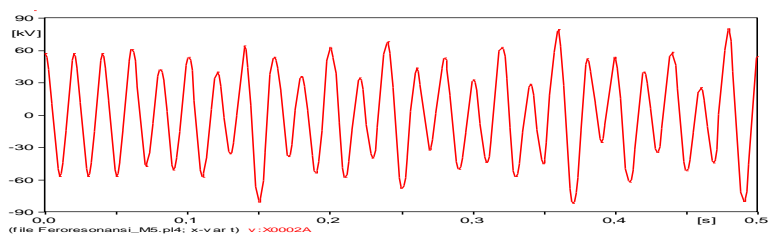


(c)

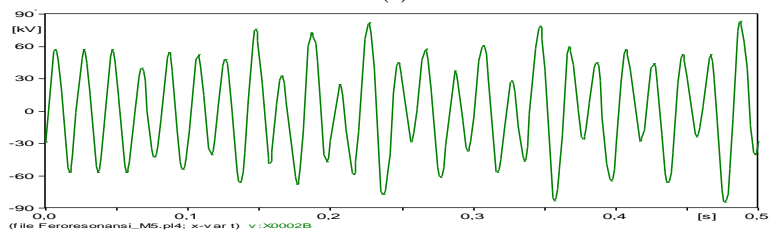


(d)

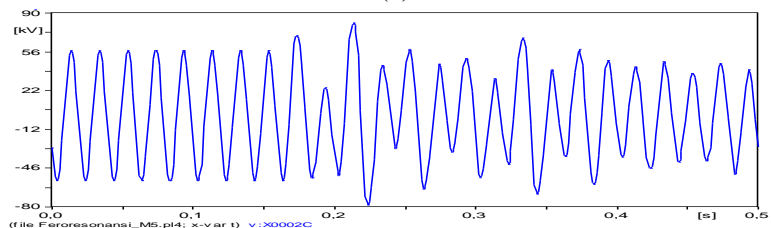
Gambar 4. 17 Respon tegangan ferresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



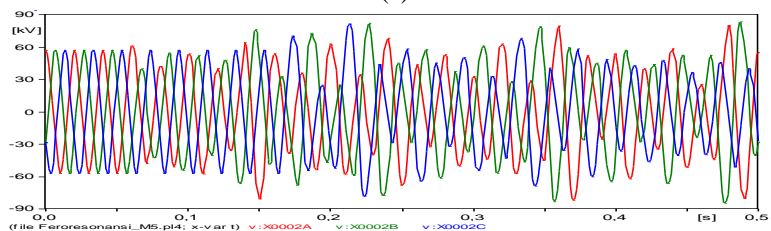
(a)



(b)

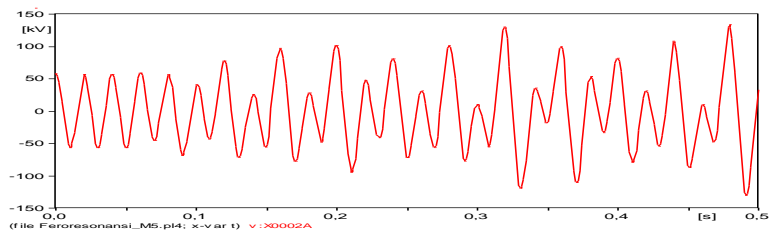


(c)

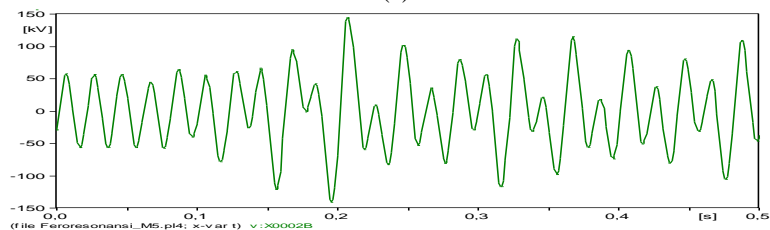


(d)

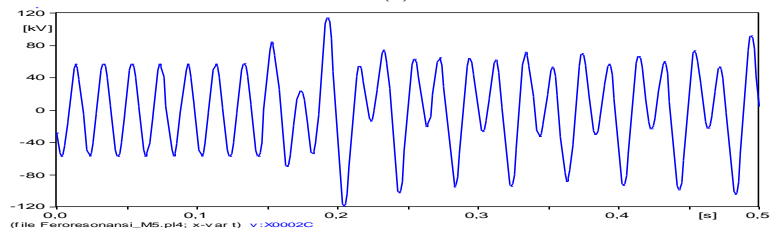
Gambar 4. 18 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



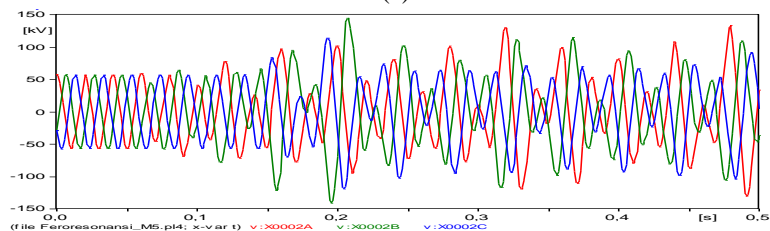
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 19 Respon tegangan ferresonansi dengan C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

4.2.1.4 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$

Gambar 4.20 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 96,11kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 92,68kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi yaitu pada fasa A dan C sebesar 1,62 dan 1,68 dari kondisi normal.

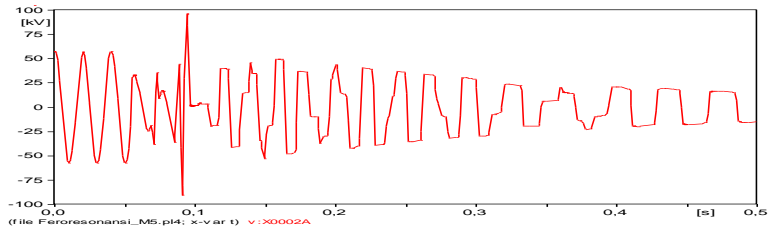
Gambar 4.21 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 96,76kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 93,05kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi yaitu pada fasa A dan C sebesar 1,62 dan 1,69 dari kondisi normal.

Gambar 4.22 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 120,91kV, pada fasa-B sebesar 131,65kV, pada fasa-C sebesar 140,28kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 2,11-2,45 dari kondisi normal.

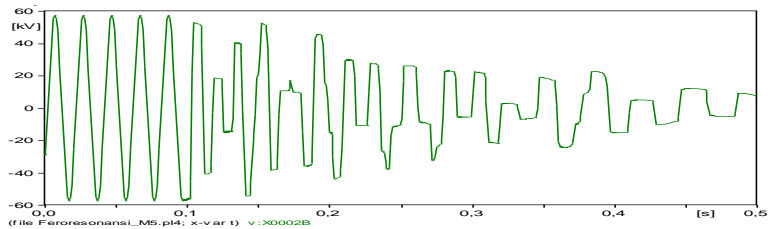
Gambar 4.23 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 311,73kV, pada fasa-B sebesar 300,64kV, pada fasa-C sebesar 270,33kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 4,73-5,45 dari kondisi normal.

Gambar 4.24 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 976,29kV, pada fasa-B sebesar 948,89kV, pada fasa-C sebesar 970kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 16,6-17,08 dari kondisi normal.

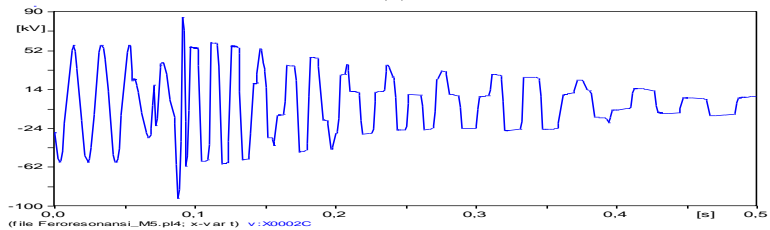
Gambar 4.25 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 121,17kV, pada fasa-B sebesar 210,38kV, pada fasa-C sebesar 223,88kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 2,1-3,91 dari kondisi normal.



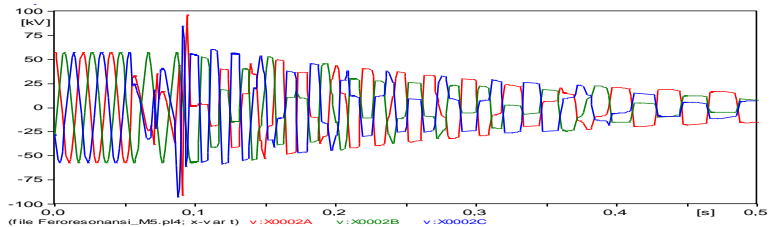
(a)



(b)

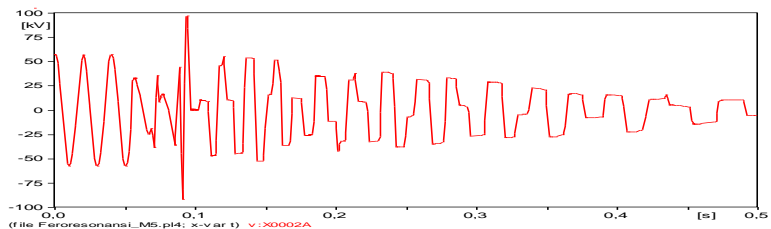


(c)

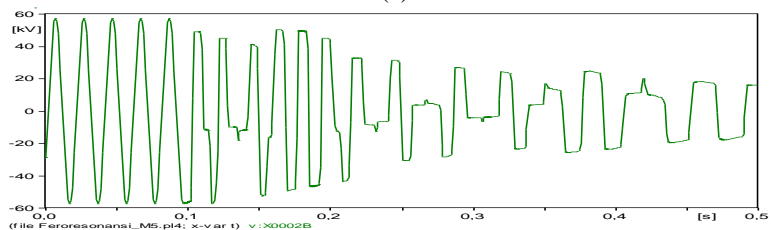


(d)

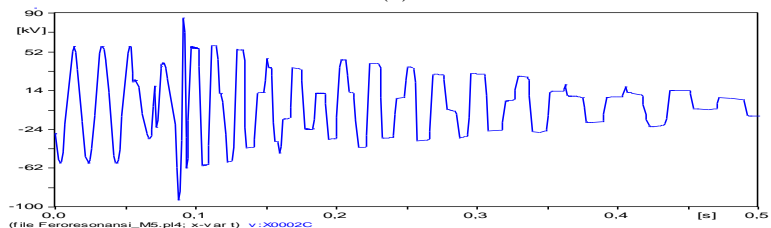
Gambar 4.20 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0.0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



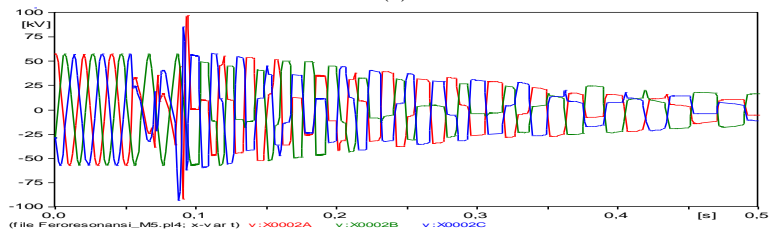
(a)



(b)

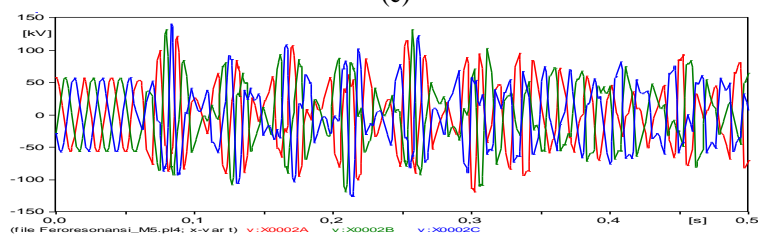
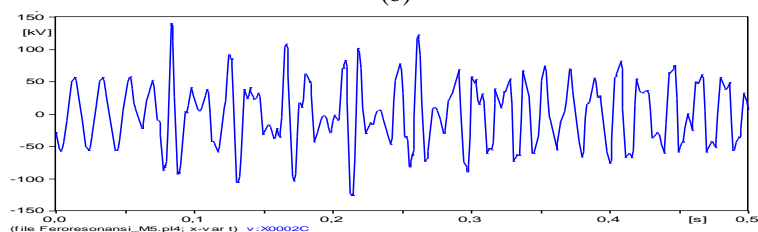
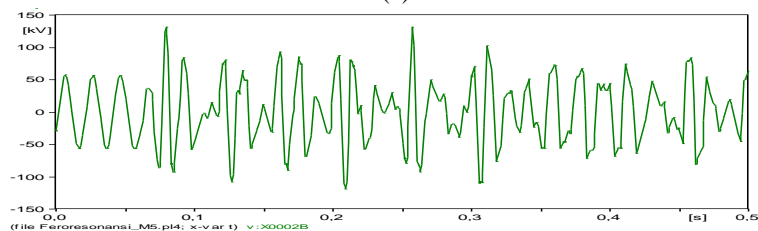
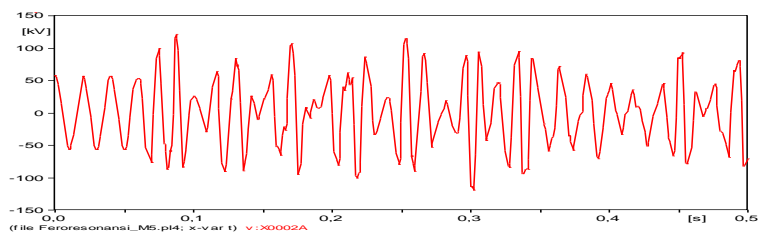


(c)

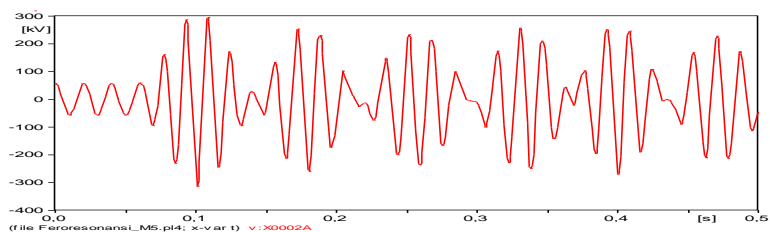


(d)

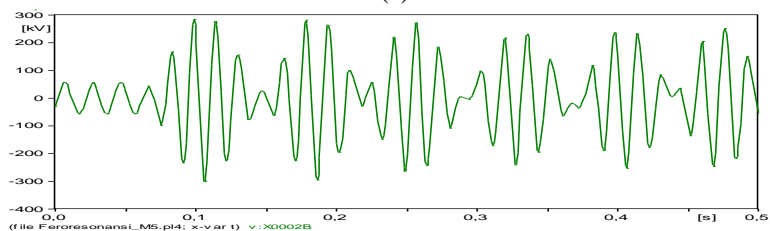
Gambar 4. 21 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g2} sebesar $0.001\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



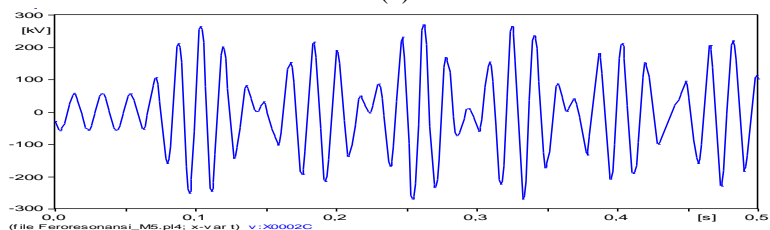
Gambar 4. 22 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0.5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



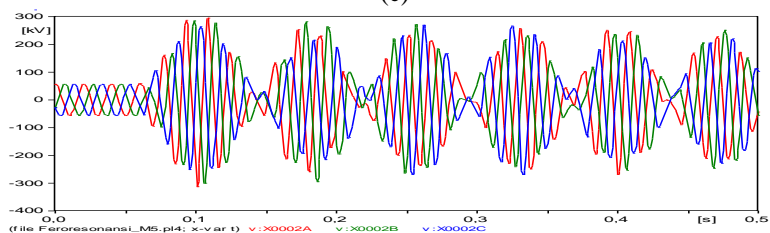
(a)



(b)

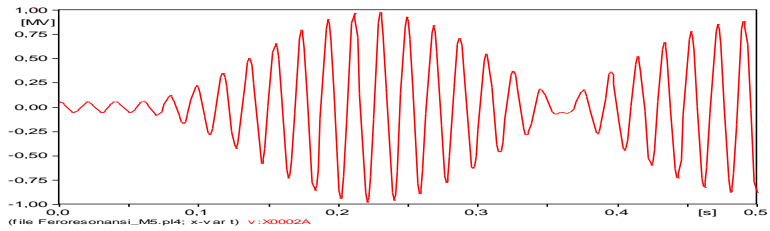


(c)

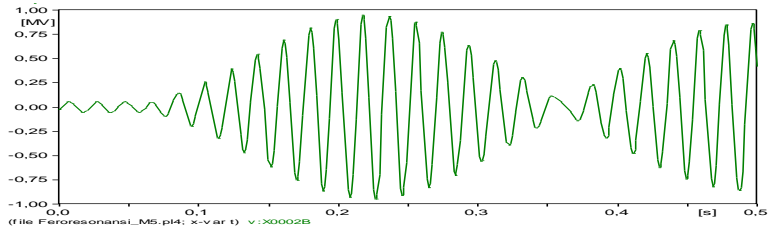


(d)

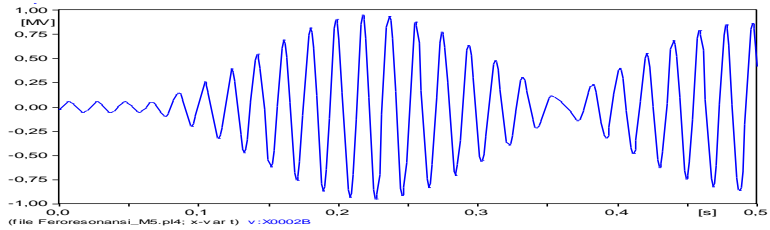
Gambar 4. 23 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



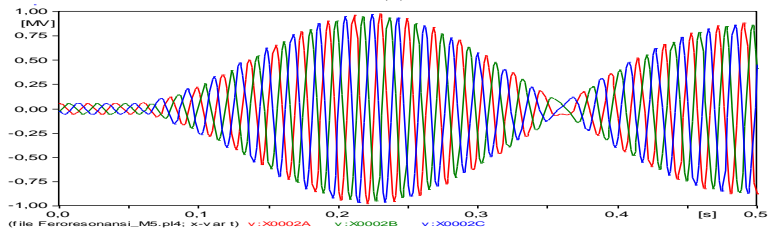
(a)



(b)

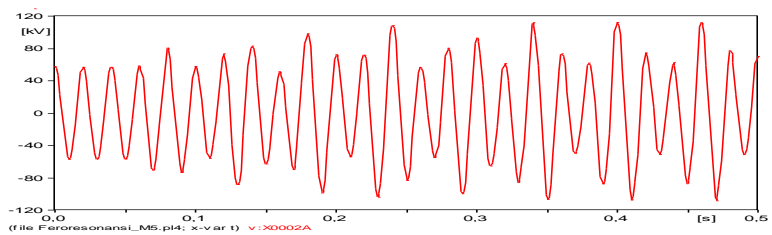


(c)

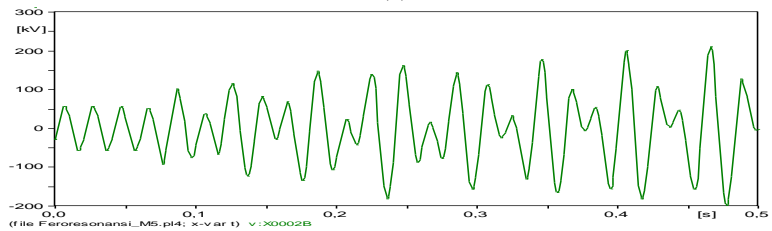


(d)

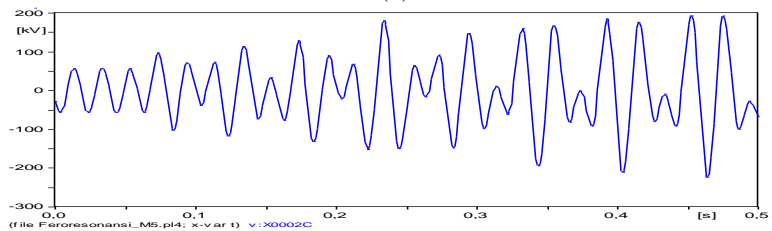
Gambar 4. 24 Respon tegangan ferresonansi dengan C_g sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



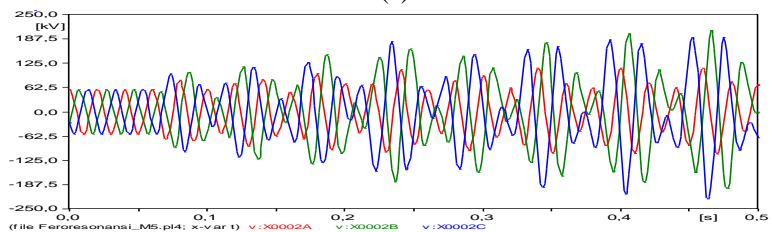
(a)



(b)



(c)



Gambar 4. 25 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0.5\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

4.2.1.5 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$

Gambar 4.26 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 55,21kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 57,14kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya sangat mendekati kondisi normal.

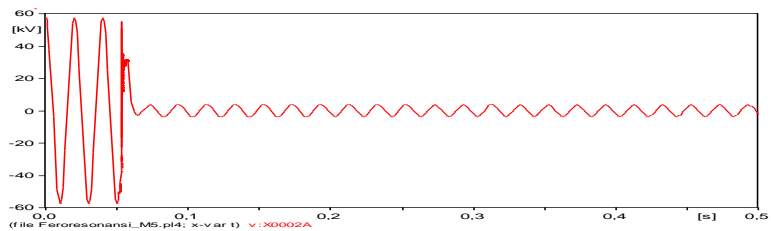
Gambar 4.27 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 55,18kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 57,14kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya sangat mendekati kondisi normal.

Gambar 4.28 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 159,93kV, pada fasa-B sebesar 141,44kV, pada fasa-C sebesar 148,4kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 2,47-2,79 dari kondisi normal.

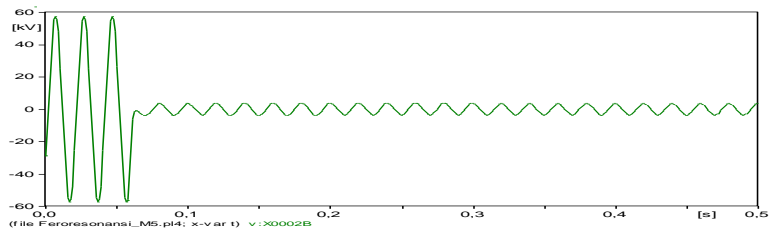
Gambar 4.29 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 300,19kV, pada fasa-B sebesar 288,83kV, pada fasa-C sebesar 277,78kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 4,86-5,25 dari kondisi normal.

Gambar 4.30 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 844,82kV, pada fasa-B sebesar 813,49kV, pada fasa-C sebesar 827,19kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 14,23-14,78 dari kondisi normal.

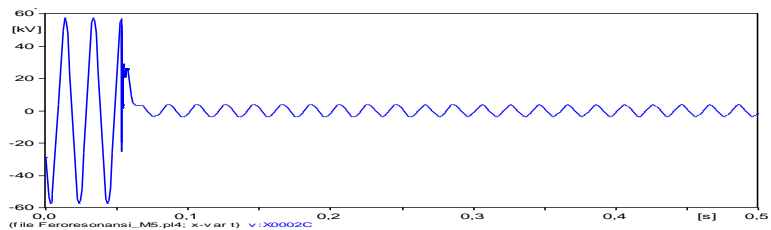
Gambar 4.31 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 107,47kV, pada fasa-B sebesar 147,49kV, pada fasa-C sebesar 153,77kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,88-2,69 dari kondisi normal.



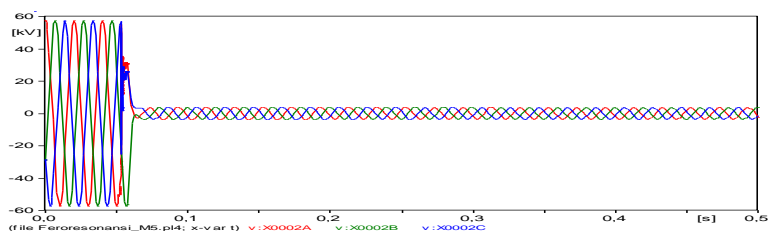
(a)



(b)

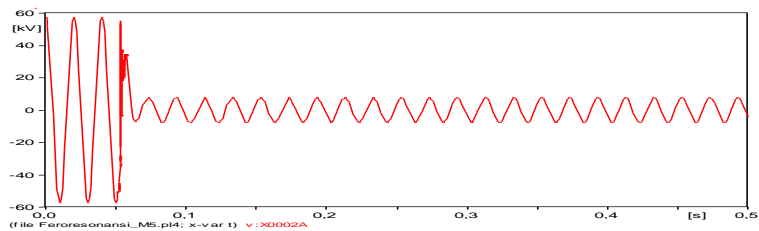


(c)

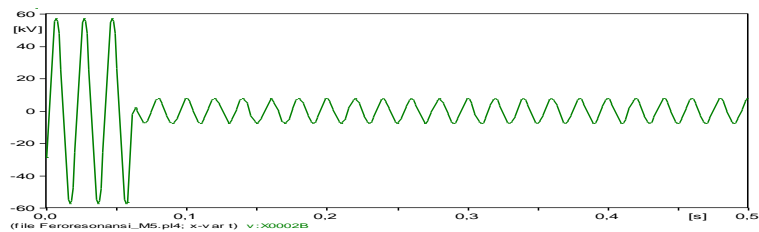


(d)

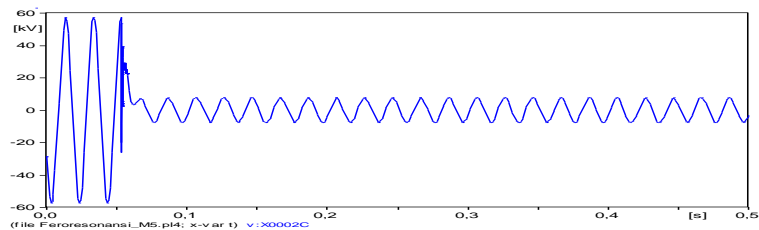
Gambar 4. 26 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0.0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



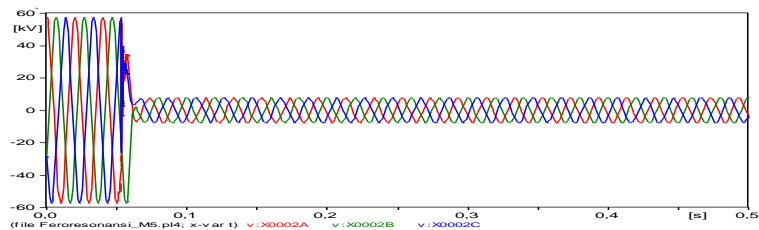
(a)



(b)

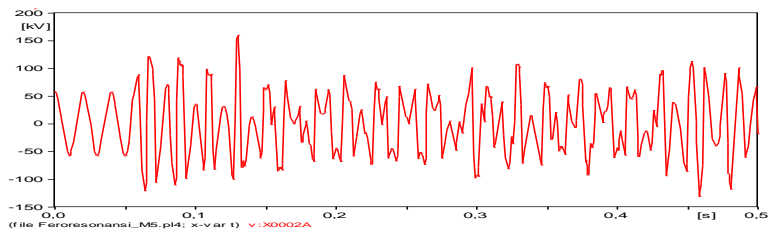


(c)

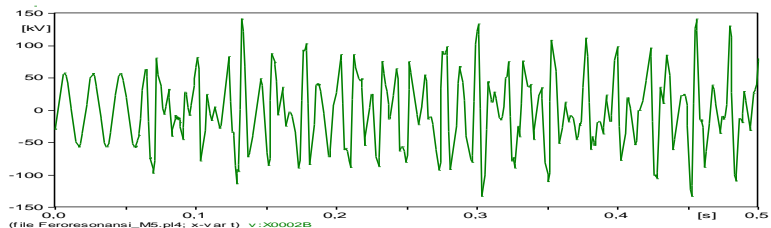


(d)

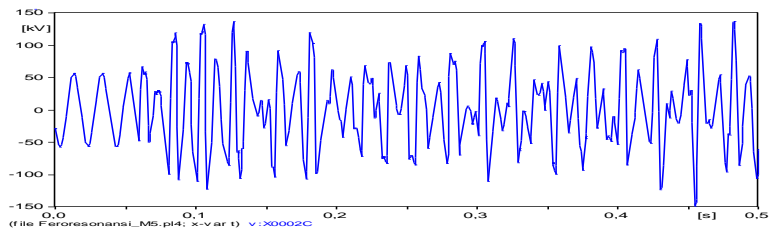
Gambar 4. 27 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g2} sebesar $0.001\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



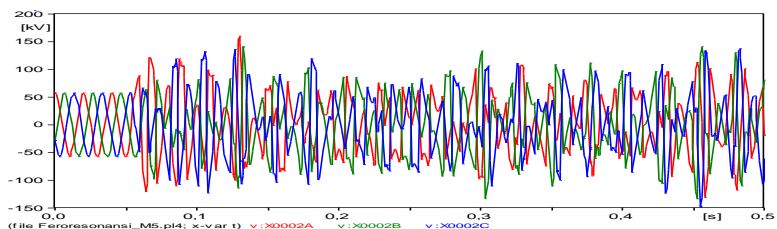
(a)



(b)

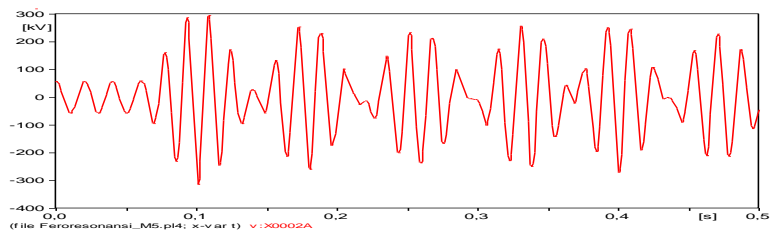


(c)

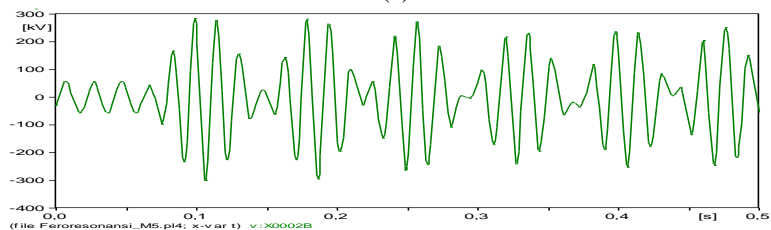


(d)

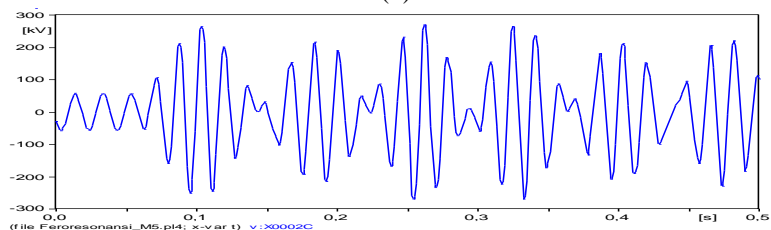
Gambar 4. 28 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0.5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



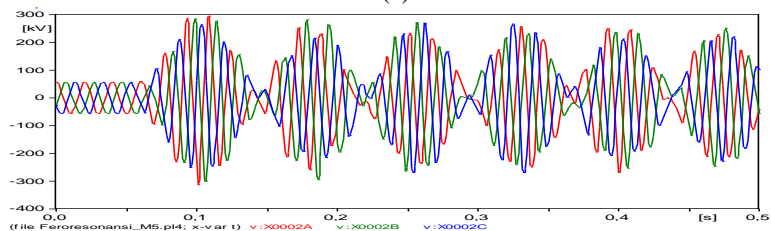
(a)



(b)

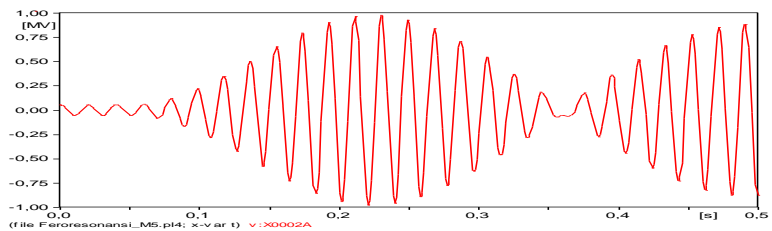


(c)

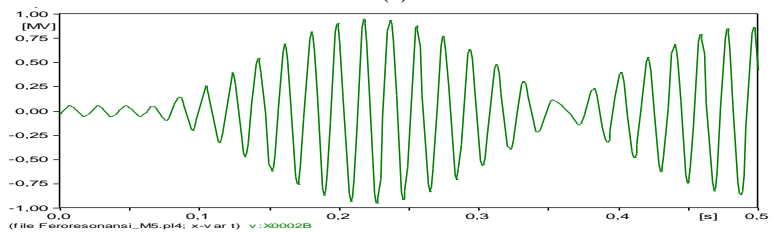


(d)

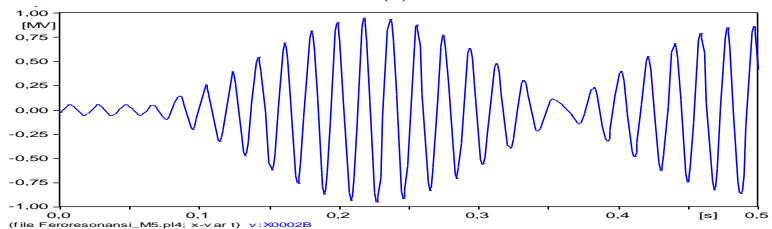
Gambar 4. 29 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



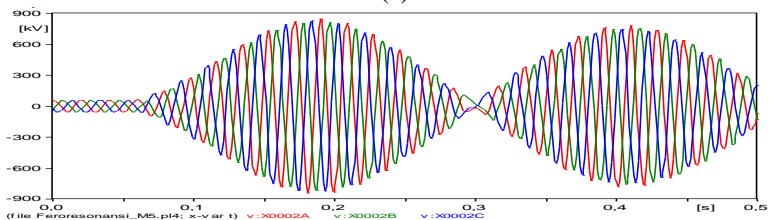
(a)



(b)

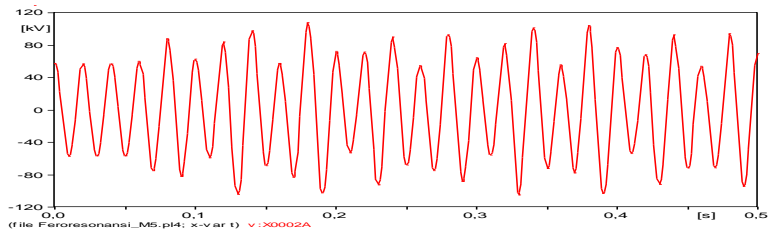


(c)

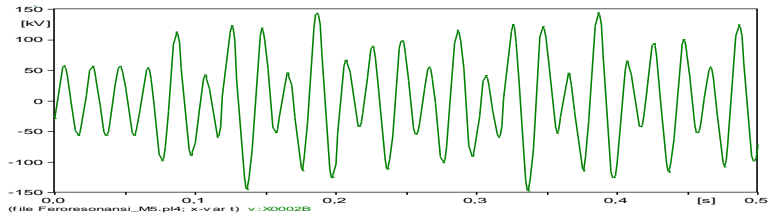


(d)

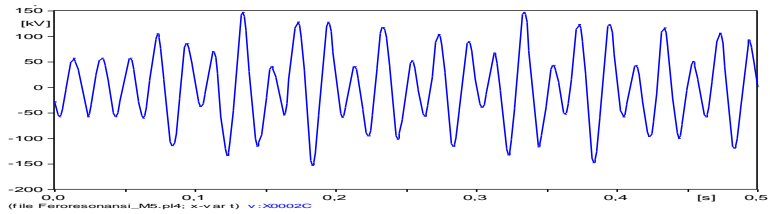
Gambar 4. 30 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



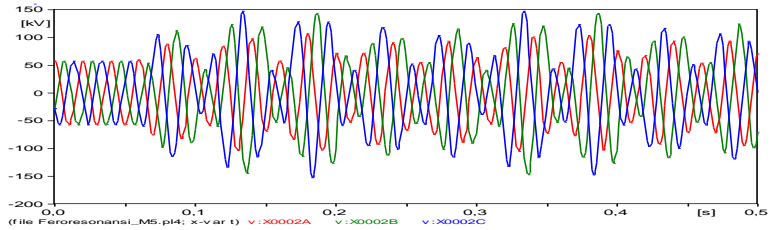
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 31 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0.001\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

4.2.1.6 Respon Tegangan Feroresonansi Dengan Nilai $C_{g1}=0,0005\mu\text{F}$ sampai $C_{g6}=20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$

Gambar 4.32 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g1} sebesar $0,0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 53,82kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 57,14kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya sangat mendekati kondisi normal.

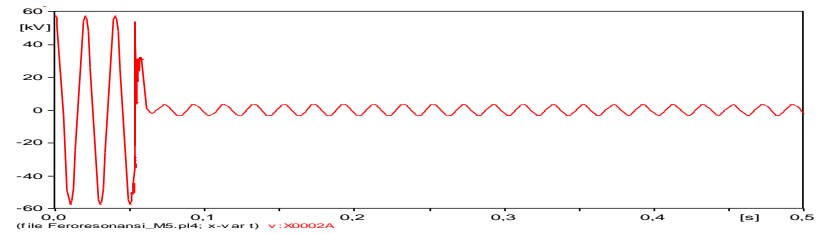
Gambar 4.33 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g2} sebesar $0,001\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 55,22kV, pada fasa-B sebesar 57,15kV, pada fasa-C sebesar 57,14kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya sangat mendekati kondisi normal.

Gambar 4.34 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g3} sebesar $0,5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 152,7kV, pada fasa-B sebesar 146,64kV, pada fasa-C sebesar 147,63kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 2,56-2,67 dari kondisi normal.

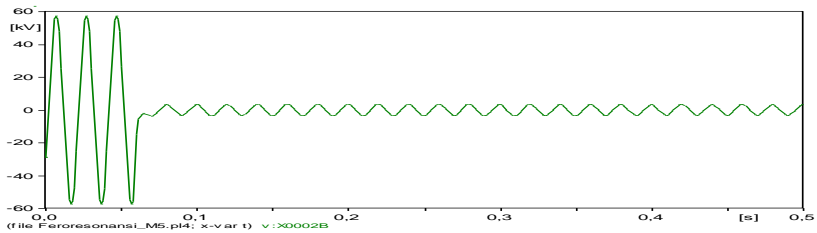
Gambar 4.35 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 300,18kV, pada fasa-B sebesar 288,82kV, pada fasa-C sebesar 276,29kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 4,83-5,25 dari kondisi normal.

Gambar 4.36 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 844,69kV, pada fasa-B sebesar 813,38kV, pada fasa-C sebesar 827,08kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 14,23-14,78 dari kondisi normal.

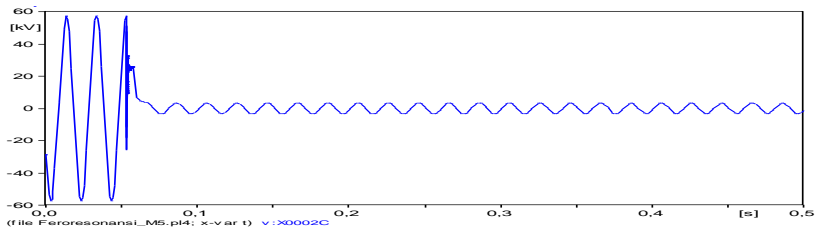
Gambar 4.37 merupakan respon tegangan feroresonansi yang disebabkan karena variasi nilai kapasitansi C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0,0005\mu\text{F}$. Dari hasil plot respon tegangan puncak pada fasa-A sebesar 107,45kV, pada fasa-B sebesar 147,53kV, pada fasa-C sebesar 152,73kV. Dari hasil simulasi respon tegangan akibat feroresonansi nilainya 1,88-2,67 dari kondisi normal.



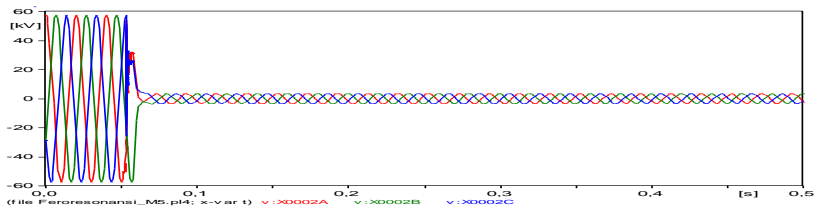
(a)



(b)

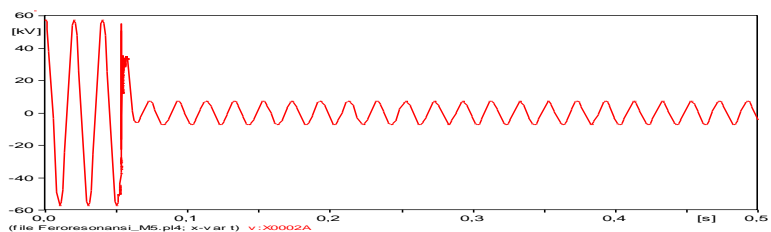


(c)

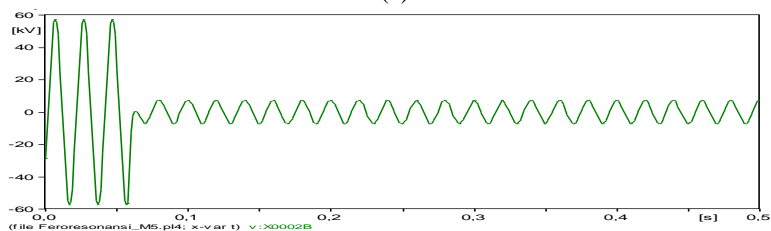


(d)

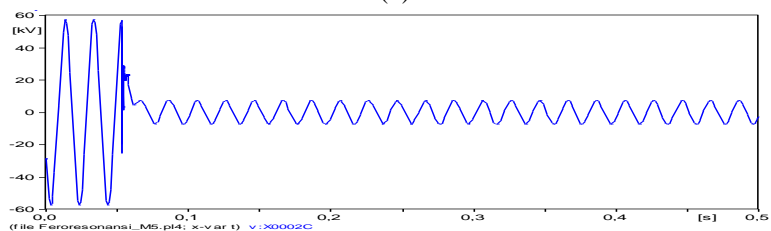
Gambar 4.32 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g1} sebesar $0.0005\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



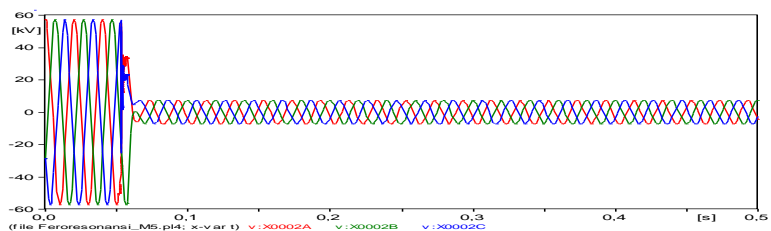
(a)



(b)

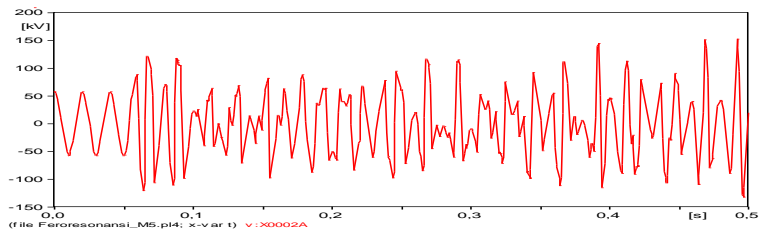


(c)

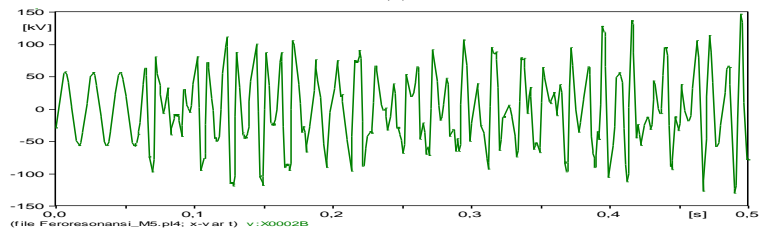


(d)

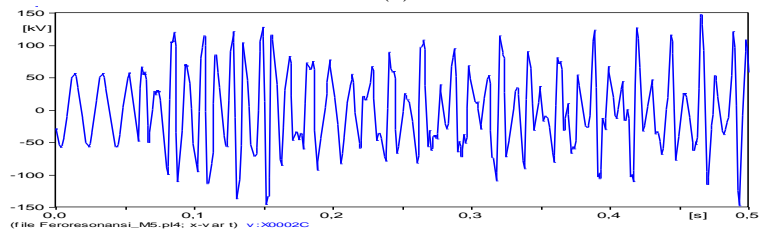
Gambar 4. 33 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g2} sebesar $0.001\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



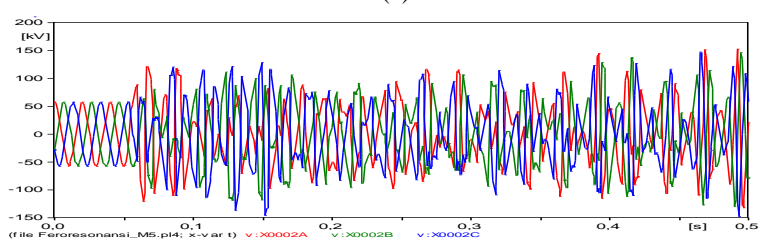
(a)



(b)

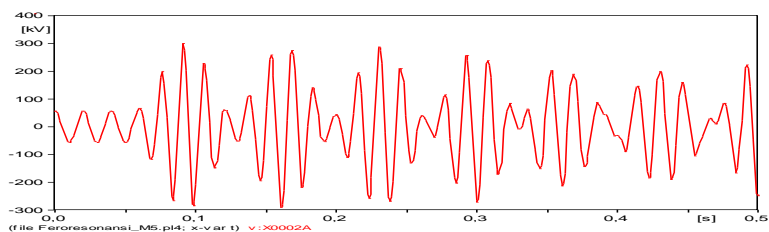


(c)

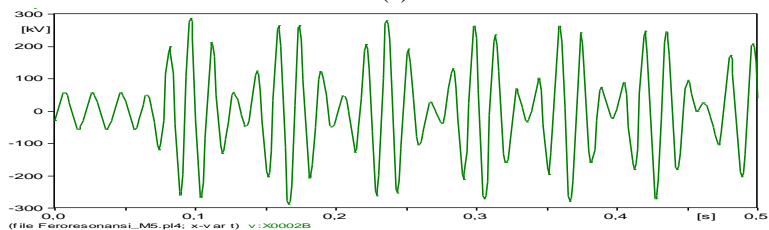


(d)

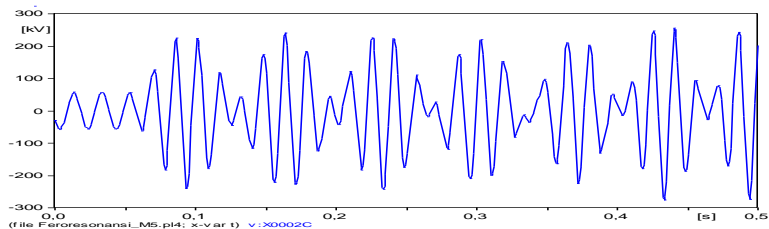
Gambar 4. 34 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g3} sebesar $0.5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



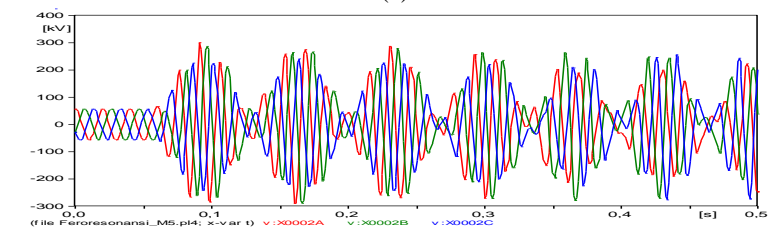
(a)



(b)

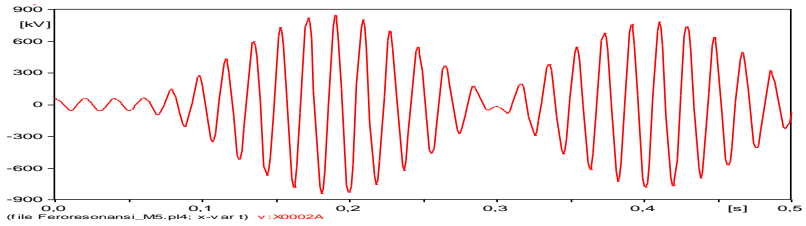


(c)

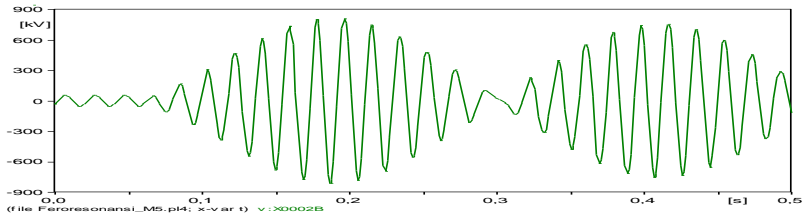


(d)

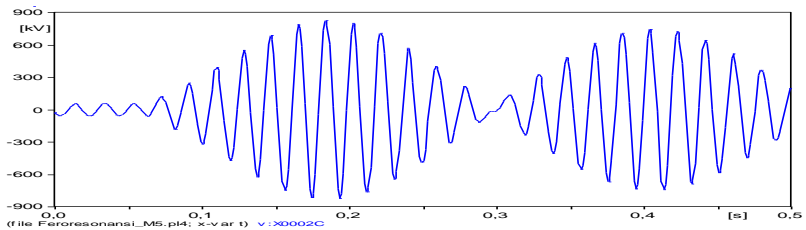
Gambar 4. 35 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g4} sebesar $5\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



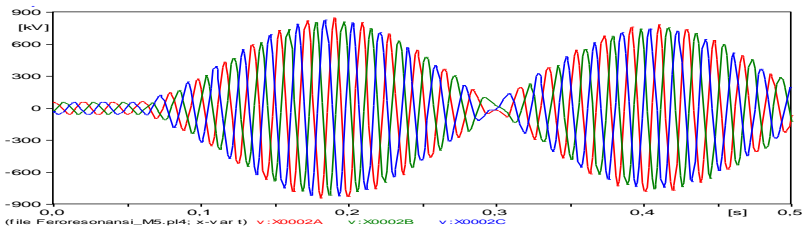
(a)



(b)

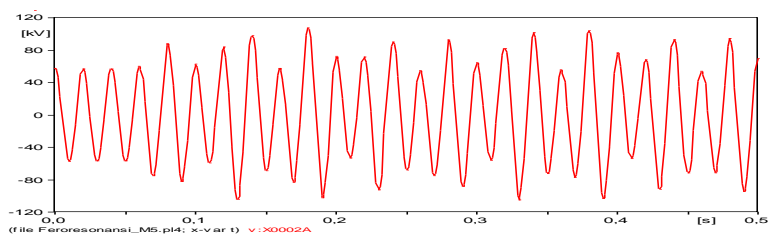


(c)

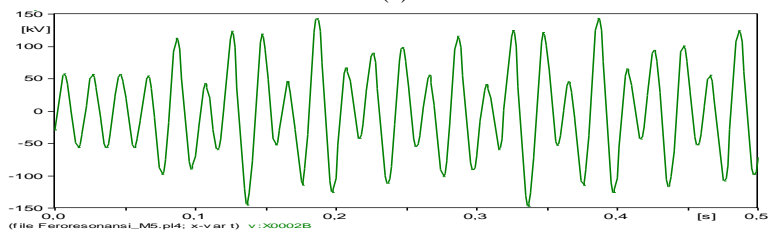


(d)

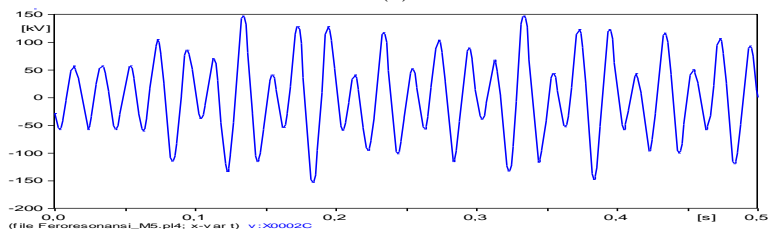
Gambar 4. 36 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g5} sebesar $10\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa



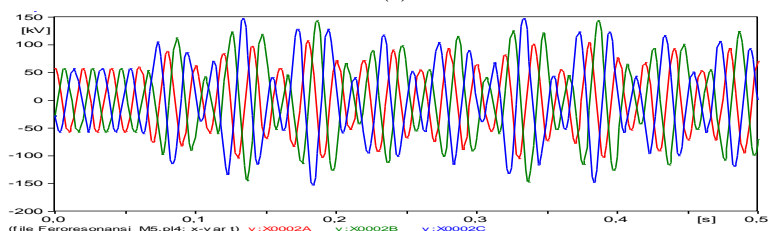
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 37 Respon tegangan feroresonansi dengan C_{g6} sebesar $20\mu\text{F}$ dan $C_s=0.0005\mu\text{F}$ (a) Respon tegangan pada fasa-A (b) Respon tegangan pada fasa-B (c) Respon tegangan pada fasa-C(d) Respon tegangan tiga fasa

4.2.2.1 Grafik Perbandingan Respon Tegangan Akibat Variasi C_g dan C_s

Pada Gambar 4.38 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $0,0005\mu\text{F}$. Respon tegangan yang paling besar ditunjukkan ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$, yaitu fasa-A= 844,69 kV, fasa-B= 813,38 kV, fasa-C= 827,08kV. Nilai tegangan puncak akibat feroresonansi yang terbesar mencapai 14,7 kali lipat dari kondisi normal.

Gambar 4.39 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $0,001\mu\text{F}$. Respon tegangan yang paling besar ditunjukkan ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$, yaitu fasa-A= 844,82 kV, fasa-B= 813,49 kV, fasa-C= 827,19kV. Nilai tegangan puncak akibat feroresonansi yang terbesar mencapai 14,7 kali lipat dari kondisi normal yaitu pada fasa-A.

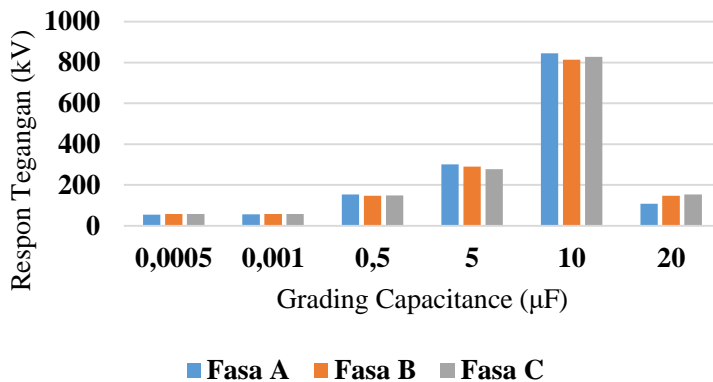
Gambar 4.40 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $0,5\mu\text{F}$. Respon tegangan yang paling besar ditunjukkan ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$, yaitu fasa-A= 976,29 kV, fasa-B= 948,89kV, fasa-C= 970kV. Nilai tegangan puncak akibat feroresonansi yang terbesar mencapai 16,9kali lipat dari kondisi normal yaitu pada fasa-A. Pada variasi nilai C_g dan C_s ini terjadi respon tegangan feroresonansi terbesar.

Gambar 4.41 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $5\mu\text{F}$. Respon tegangan yang paling besar ditunjukkan ketika nilai $C_g=5\mu\text{F}$, yaitu fasa-A= 469,5 kV, fasa-B= 665,78 kV, fasa-C= 667,03kV. Nilai tegangan puncak akibat feroresonansi yang terbesar mencapai 11,6 kali lipat dari kondisi normal yaitu pada fasa-C.

Gambar 4.42 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $10\mu\text{F}$. Respon tegangan yang dihasilkan nilainya relatif tidak berbeda jauh antar fasanya. Ini terbukti dari grafik ketika nilai C_g lebih kecil dari nilai C_s respon tegangan feroresonansi yang dihasilkan nilainya tidak jauh berbeda berkisar diantara 80kV-100kV.

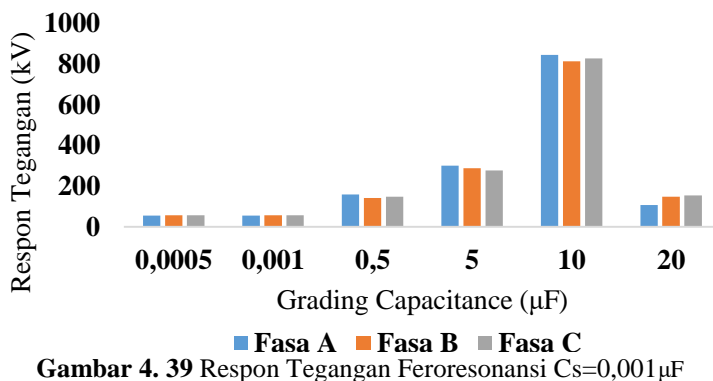
Gambar 4.43 menunjukkan hasil respon tegangan fasa A-B-C yang telah disimulasikan dengan menggunakan ATPDraw. Nilai C_g yang digunakan bervariasi antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$ sedangkan nilai C_s konstan sebesar $20\mu\text{F}$. Respon tegangan yang dihasilkan tidak pernah melebihi 90kV dari semua nilai C_g yang divariasikan. Respon fasa-A terbesar yaitu $79,07\text{kV}$, fasa-B $84,5\text{kV}$ dan fasa C $71,35\text{kV}$

Respon Tegangan Feroresonansi $C_s=0,0005\mu\text{F}$

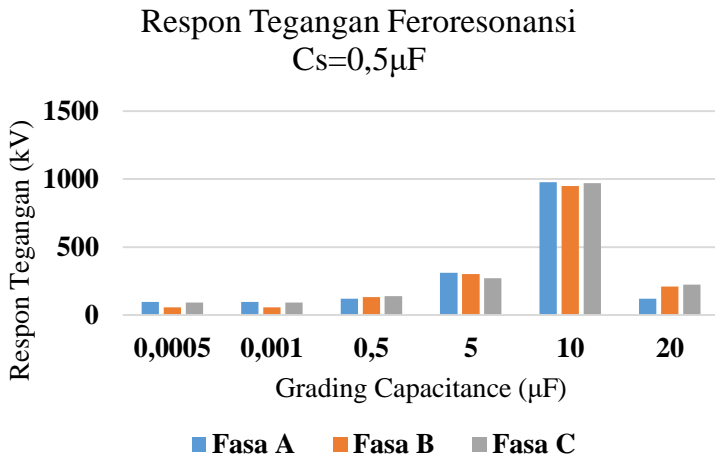


Gambar 4. 38 Respon Tegangan Feroresonansi $C_s=0,0005\mu\text{F}$

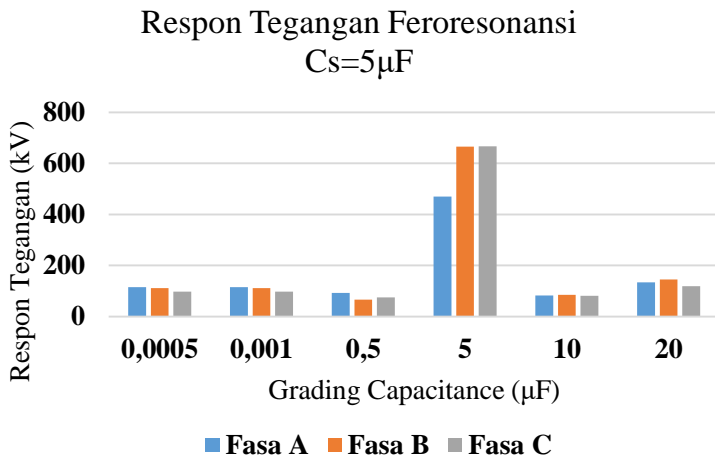
Respon Tegangan Feroresonansi $C_s=0,001\mu\text{F}$



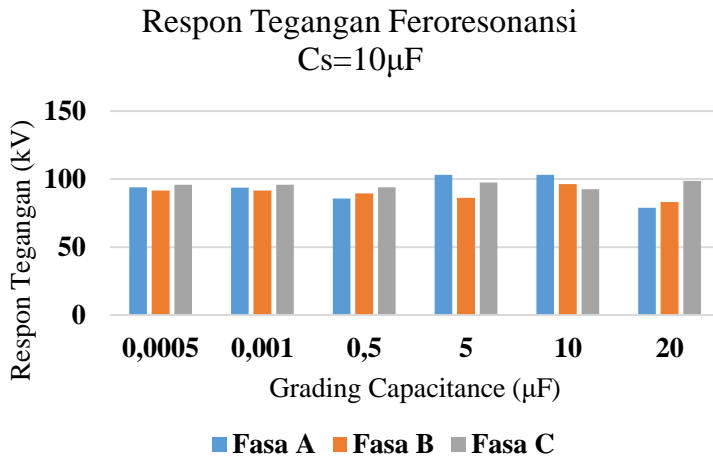
Gambar 4. 39 Respon Tegangan Feroresonansi $C_s=0,001\mu\text{F}$



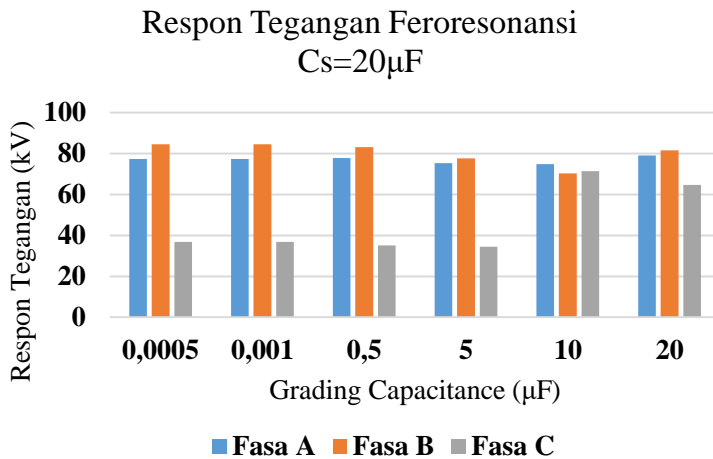
Gambar 4. 40 Respon Tegangan Ferroresonansi $C_s=0,5\mu\text{F}$



Gambar 4. 41 Respon Tegangan Ferroresonansi $C_s=5\mu\text{F}$



Gambar 4. 42 Respon Tegangan Feroresonansi Cs=10 μ F



Gambar 4. 43 Respon Tegangan Feroresonansi Cs=20 μ F

4.2.2.2 Grafik 3 Dimensi Hasil Simulasi

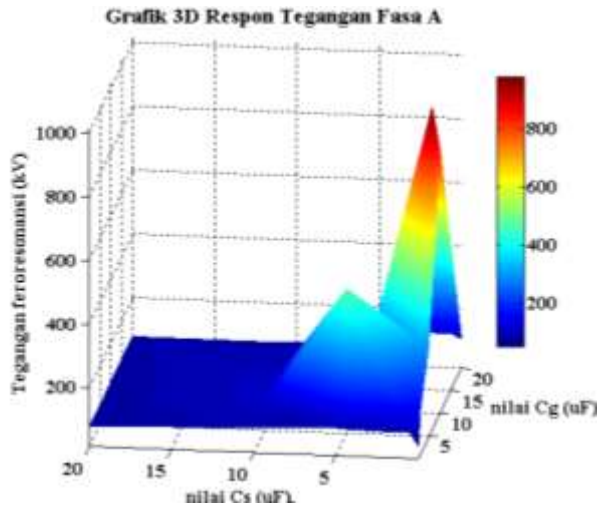
Setelah melakukan simulasi pada ATPDraw, tahap selanjutnya yaitu melakukan pengolahan data pada MATLAB untuk mendapatkan grafik 3D dari hasil simulasi. Terdapat 3 grafik 3D yang merupakan hasil dari simulasi timbulnya feroresonansi akibat variasi nilai parameter C_g dan C_s , ketiga grafik 3D tersebut merupakan respon tegangan tiap fasa, yaitu fasa A,B, dan C. Nilai C_g dan C_s yang divariasikan yaitu berkisar antara $0,0005\mu\text{F}$ - $20\mu\text{F}$. Dengan kondisi normal tegangan puncak yang didapatkan yaitu sebesar $57,15\text{kV}$ pada setiap fasanya.

Pada gambar 4.44 yang merupakan grafik 3D respon tegangan fasa A akibat feroresonansi menunjukkan bahwa nilai respon tegangan puncak terbesar sebesar $976,3\text{kV}$. Respon tegangan puncak paling besar tersebut terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari kondisi normalnya terjadi kondisi abnormal yaitu tegangan lebih yang mencapai 17 kali lipat dari kondisi normal. Sedangkan nilai tegangan puncak terbesar kedua terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Nilai tegangan puncak yang terjadi yaitu sebesar $844,8\text{kV}$ hampir 15 kali lipat dari kondisi normal.

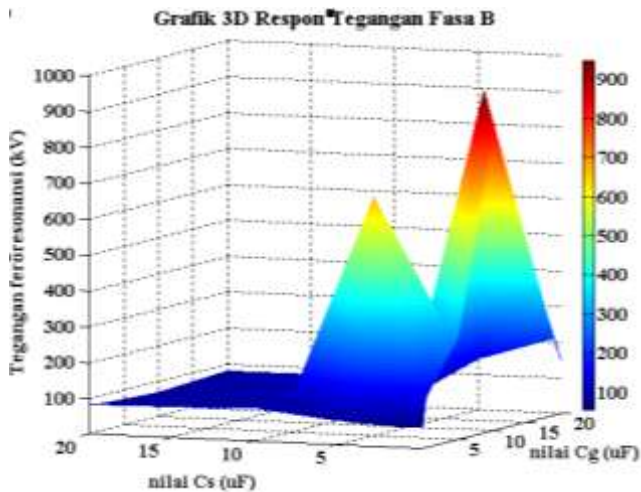
Pada gambar 4.45 yang merupakan grafik 3D respon tegangan fasa B akibat feroresonansi menunjukkan bahwa nilai respon tegangan puncak terbesar sebesar $948,89\text{kV}$. Respon tegangan terbesar terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari kondisi normalnya terjadi kondisi abnormal yaitu tegangan lebih yang mencapai 16,6 kali lipat dari kondisi normal. Sedangkan nilai tegangan puncak terbesar kedua terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Nilai tegangan puncak yang terjadi yaitu sebesar $813,49\text{kV}$ hampir 14,2 kali lipat dari kondisi normal.

Pada gambar 4.46 yang merupakan grafik 3D respon tegangan fasa C akibat feroresonansi menunjukkan bahwa nilai respon tegangan puncak terbesar sebesar 970kV . Respon tegangan terbesar terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Dari kondisi normalnya terjadi kondisi abnormal yaitu tegangan lebih yang mencapai 16,9 kali lipat dari kondisi normal. Sedangkan nilai tegangan puncak terbesar kedua terjadi ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,001\mu\text{F}$. Nilai tegangan puncak yang terjadi yaitu sebesar $827,19\text{kV}$ hampir 14,4 kali lipat dari kondisi normal.

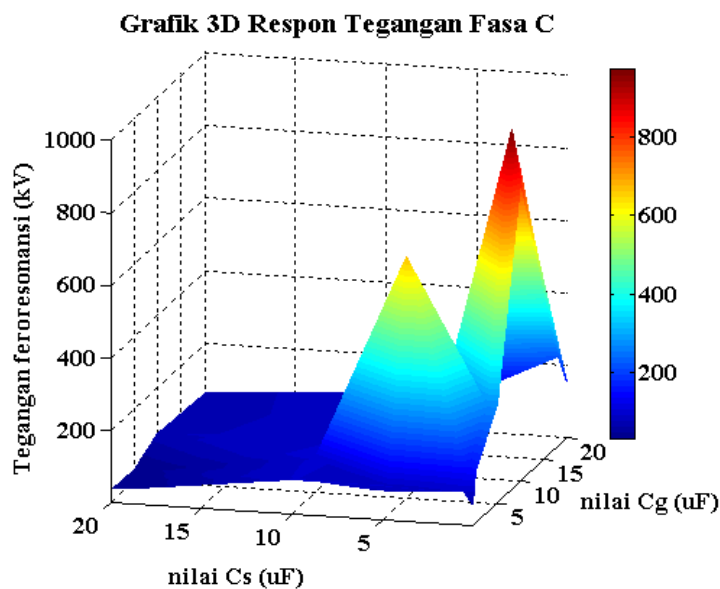
Dari grafik 3D respon tegangan fasa A,B, dan C dihasilkan nilai tegangan feroresonansi terbesar yaitu ketika nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$. Disaat nilai C_g lebih besar 20 kali lipat dari C_s maka nilai respon tegangan akibat feroresonansinya juga menjadi sangat besar, 14-17 kali lipat dari kondisi normal.



Gambar 4. 44 Grafik 3D respon tegangan feroresonansi fasa A akibat variasi nilai Cg dan Cs



Gambar 4. 45 Grafik 3D respon tegangan feroresonansi fasa B akibat variasi nilai Cg dan Cs



Gambar 4. 45 Grafik 3D respon tegangan feroresonansi fasa C akibat variasi nilai Cg dan Cs

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang dilakukan dengan perangkat lunak ATPDraw, maka dapat disimpulkan beberapa hal berikut :

1. Variasi nilai kapasitansi sistem (C_g dan C_s) mempengaruhi respon tegangan yang ada pada sisi primer dan sekunder trafo. Hasil respon tegangan dapat mengakibatkan adanya *overvoltage* dan *undervoltage* pada hasil respon tegangan.
2. Dengan melakukan variasi nilai kapasitansi sistem C_g dan C_s menghasilkan respon mode feroresonansi yang berbeda-beda antar tiap fasa.
3. Nilai kapasitansi sistem yang menghasilkan respon tegangan respon yang paling besar yaitu ketika nilai C_g lebih besar daripada nilai C_s . Nilai $C_g=10\mu\text{F}$ dan $C_s=0,5\mu\text{F}$.
4. Pada rentang nilai kapasitansi (C_g dan C_s) yang divariasikan dapat terjadi gangguan feroresonansi maksimal yaitu 976,29kV pada fasa A, 948,89kV pada fasa-B, dan 970kV pada fasa-C.
5. Pada variasi nilai kapasitansi C_g terkecil yaitu $0,0005\mu\text{F}$ dan nilai kapasitansi C_s terbesar $20\mu\text{F}$ respon tegangan dengan nilai fase-A 77,35kV, fase-B 84,5kV, fase-C 36,86kV.
6. Pada variasi nilai kapasitansi C_g terbesar yaitu $20\mu\text{F}$ dan nilai kapasitansi C_s terkecil $0,0005\mu\text{F}$ respon tegangan dengan nilai fase-A 107,45kV, fase-B 147,53kV, fase-C 152,73kV.
7. Pada variasi nilai kapasitansi C_g terkecil yaitu $0,0005\mu\text{F}$ dan nilai kapasitansi C_s terkecil $0,0005\mu\text{F}$ respon tegangan dengan nilai fase-A 53,82kV, fase-B 57,15kV, fase-C 57,14kV.
8. Pada variasi nilai kapasitansi C_g terbesar yaitu $20\mu\text{F}$ dan nilai kapasitansi C_s terbesar $20\mu\text{F}$ respon tegangan dengan nilai fase-A 79,07kV, fase-B 81,5kV, fase-C 64,58kV.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya, saran yang dapat dilakukan yaitu dengan mencoba memvariasikan nilai C_g dan C_s pada tipe inti yang berbeda dengan rentang nilai variasi yang besar pula. Karena respon yang akan dihasilkan dari perbedaan tipe inti trafo dengan nilai variasi yang

besar akan menghasilkan kesimpulan yang beragam. Sehingga dari semua kesimpulan yang didapatkan nantinya dapat menjadi referensi dalam pemilihan penggunaan transformator berdasarkan jenis intinya. Sehingga dalam pemilihan transformator nantinya akan menghasilkan pemilihan yang tepat, efisien, dan handal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. P. Ang, *Ferroresonance Simulation Studies Of Transmission Systems*, Manchester: University Of Manchester, 2010.
- [2] R. Hidayat, I. M. Y. Negara dan I. S. Hernanda, “Analisis Pengaruh Karakteristik Histerisis Inti Transformator Terhadap Gangguan Ferroresonansi,” Tugas Akhir, Elektro ITS, 2018.
- [3] A. Kadir, *Pembangkitan Tenaga Listrik*, Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press), 1996.
- [4] P. Ferraci, *Ferroresonance in Cahier Technique n°190*, Groupe Schneider, 1998.
- [5] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi*, Jakarta: Erlangga, 2012.
- [6] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta: Gramedia, 1996.
- [7] Y. Rijono, *Dasar Teknik Listrik*, Yogyakarta: Penerbit Andi, 1997.
- [8] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, New York: McGraw Hill, 2012.
- [9] K. Andarini, I. M. Y. Negara dan I. S. Hernanda, “Deteksi Ferroresonansi Pada Transformator Tiga Fasa Yang Tidak Simetri Terhadap Pengaruh Dari Perubahan Kapasitansi,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [10] T. S. Hutaaruk, *Transmisi Daya Listrik*, Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1982.
- [11] A. Arismunandar dan S. Kuwara, *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik*, jilid II, Jakarta: PT. Pradnya Paramitha, 1979.
- [12] T. Gonen, *Electrical Power Transmission System Engineering*, Sacramento: CRC Press, 2014.
- [13] A. I. Elmo Price, “A Tutorial on Ferroresonance,” dalam *40th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, 2014.
- [14] D. Marsudi, *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [15] I. N. Satriyadi, I. M. Y. Negara dan A. Soeprijanto, “Ferroresonance Signal Analysis with Wavelet Transform on 500kV Transmission Lines Capacitive Voltage Transformers,” *Journal of Advanced Research in Electrical Engineering*, vol. 1, 2017.

- [16] S. S. Simamora, I. M. Y. Negara dan D. Fahmi, “Studi Pemasangan Damping Reaktor untuk Mengatasi Feroresonansi pada Incoming 20kV GIS Tandes,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 4, pp. A130-A135, 2015.
- [17] L. L. Hakim, D. A. Asfani dan I. S. Hernanda, “Studi Eksperimen Menggunakan Transformasi Wavelet Dalam Mengidentifikasi Feroresonansi Pada Transformator,” Tugas Akhir, Elektro ITS, 2018.
- [18] N. I. Rifma, I. M. Y. Negara dan I. S. Hernanda, “Desain Dan Implementasi Modul Pengujian Feroresonansi Pada Transformator Tegangan Rendah,” Tugas Akhir, Elektro ITS, 2018.
- [19] K. S. Anugrah, I. M. Y. Negara dan I. S. Hernanda, “Studi Pengaruh SistemPentanahan Terhadap Feroresonansi DiGardu Induk Tegangan Tinggi,” Tugas Akhir, Elektro ITS, 2018.

LAMPIRAN

Tabel respon tegangan fasa A-B-C variasi *grading capacitance* dan *shunt capacitance*

			Respon Tegangan-Max X0002(kV) Sisi Primer Trafo		
No	Cg (μ F)	Cs (μ F)	Fase-A	Fase-B	Fase-C
1	0,0005	20	77,35	84,5	36,86
2	0,001	20	77,34	84,5	36,86
3	0,5	20	77,7	83,14	35,01
4	5	20	75,18	77,63	34,44
5	10	20	74,75	70,18	71,35
6	20	20	79,07	81,5	64,58
7	0,0005	10	93,79	91,52	95,89
8	0,001	10	93,77	91,52	95,89
9	0,5	10	85,69	89,38	93,79
10	5	10	103,11	86,25	97,33
11	10	10	103,15	96,19	92,41
12	20	10	78,81	83,17	98,55
13	0,0005	5	115,29	111,49	97,6
14	0,001	5	115,28	111,51	97,74
15	0,5	5	92,2	66,15	74,29
16	5	5	469,5	665,78	667,03
17	10	5	82,07	84,43	81,29
18	20	5	133,93	144,75	118,93

			Respon Tegangan-Max X0002(kV) Sisi Primer Trafo		
No	Cg (μ F)	Cs (μ F)	Fase-A	Fase-B	Fase-C
19	0,0005	0,5	96,11	57,15	92,68
20	0,001	0,5	96,76	57,15	93,05
21	0,5	0,5	120,91	131,65	140,28
22	5	0,5	311,73	300,64	270,33
23	10	0,5	976,29	948,89	970
24	20	0,5	121,17	210,38	223,88
25	0,0005	0,001	55,21	57,15	57,14
26	0,001	0,001	55,18	57,15	57,14
27	0,5	0,001	159,93	141,44	148,4
28	5	0,001	300,19	288,83	277,78
29	10	0,001	844,82	813,49	827,19
30	20	0,001	107,47	147,49	153,77
31	0,0005	0,0005	53,82	57,15	57,14
32	0,001	0,0005	55,22	57,15	57,14
33	0,5	0,0005	152,7	146,64	147,63
34	5	0,0005	300,18	288,82	276,29
35	10	0,0005	844,69	813,38	827,08
36	20	0,0005	107,45	147,53	152,73

RIWAYAT HIDUP



Fuady Achmad Santoso, lahir di Malang, 1 Mei 1993. Anak kedua dari lima bersaudara. Selama masa perkuliahan selain kuliah juga mengikuti pendidikan agama di PPM Khoirul Huda Surabaya. Selain itu, penulis juga menjadi pengurus santri di PPM Koirul Huda Surabaya mulai tahun 2011-2015. Antara lain yaitu Koordinator Ketertiban, Koordinator

Tamu. Penulis juga pernah menjadi melakukan pengabdian masyarakat yaitu menjadi pengurus Masjid Khoirul Huda Nginden Surabaya 2015-2016 serta guru mengaji di TPA Khoirul Huda selama 1 tahun. Pendidikan formal yang pernah ditempuh yaitu :

1. SD Al-Muslim Sidoarjo
2. SMPN 1 Waru Sidoarjo
3. SMAN 15 Surabaya

Penulis dapat dihubungi melalui email : sifuady@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)